

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Felipe Fontana de Pauli

CONTROLE ELETRÔNICO DE VÁLVULAS
BORBOLETAS DUPLAS PARA MOTORES DE CICLO
OTTO COM CILINDROS CONTRAPOSTOS (BOXER)

Passo Fundo

2017

Felipe Fontana de Pauli

CONTROLE ELETRÔNICO DE VALVULAS
BORBOLETAS DUPLAS PARA MOTORES DE CICLO
OTTO COM CILINDROS CONTRAPOSTOS (BOXER)

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Mikhail Polonskii.

Passo Fundo

2017

Felipe Fontana de Pauli

Controle eletrônico de válvulas borboletas duplas para motores de ciclo otto com cilindros contrapostos (boxer)

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Mikhail Polonskii.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mikhail Polonskii - UPF

Prof. Dr. Fernando Passold - UPF

Prof. MSc. Joan Michel Levandoski- UPF

Dedico este trabalho aos meus pais, por serem os meus maiores incentivadores e por todo apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, meus irmãos e minha esposa, pelo apoio e suporte.

Ao professor Mikhaill Polonskii, orientador deste trabalho, pelos seus conhecimentos, sua atenção e boa vontade.

À UPF, professores e funcionários.

RESUMO

Em um motor de combustão interna (MCI), a válvula borboleta é o atuador principal para o sistema de admissão de ar. Este trabalho foca no desenvolvimento de um controlador PID que tem como objetivo controlar a admissão de um MCI de construção Boxer, por meio de duas válvulas borboletas dos seus coeficientes o controlador foi corretamente sintonizado. Não tendo um modelo matemático definido das válvulas borboletas, o objetivo é definir os parâmetros do controlador por meio de métodos experimentais. Aplicando tais métodos foi possível obter a resposta dinâmica das válvulas borboletas por meio da aplicação de tensões conhecidas ao seu motor CC. Com os parâmetros do controlador devidamente calculados, os mesmos foram utilizados para o desenvolvimento do firmware à base de um microcontrolador, e com pequenos ajustes. Este trabalho conta também com a elaboração de um programa supervisor para análise dos sensores que compõem o controlador.

Palavras-Chave: Motor de Combustão Interna. Válvula Borboleta. Microcontrolador. Controlador PID.

ABSTRACT

In an internal combustion engine (MCI), the butterfly valve is the main actuator for the air intake system. This work focuses on the development of a PID controller that aims to control the admission of a Boxer construction MCI by means of two butterfly valves. Not having a defined mathematical model of the butterfly valves, the objective is to define the parameters of the controller by means of experimental methods. Applying such methods it was possible to obtain the dynamic response of the butterfly valves by applying known voltages to their DC motor. With the parameters of the controller properly calculated, they were used for the development of the firmware based on a microcontroller, and with small adjustments of its coefficients the controller was correctly tuned. This work also counts on the elaboration of a supervisory program to analyze the sensors that compose the controller.

Keywords: Internal Combustion Engine. Throttle Body. Microcontroller. PID Controller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes de um motor de combustão de ciclo Otto.	16
Figura 2 – Tempos do motor de ciclo Otto.	17
Figura 3 – Disposição dos componentes em um motor Boxer. Onde: 1-Pistão; 2-Cilindro; 3- Árvore de manivelas; 4-Biela.	18
Figura 4 – Motores Subaru e Volkswagen.	19
Figura 5 – Diagrama de um carburador de corpo simples.	20
Figura 6 – Sonda Lambda.	24
Figura 7 – Diagrama sistema EGAS.	25
Figura 8 – Pedal de acelerador eletrônico.	26
Figura 9 – Corpo de Borboleta com destaque no sensor de posição.	27
Figura 10 - Sensor de pressão absoluta.	28
Figura 11 – Corpo de válvula borboleta eletrônica. Onde: 1-Motor CC; 2-Engrenagens; 3-Eixo da válvula borboleta; 4-Mola; 5-Potenciômetros.	29
Figura 12 – Ângulo inicial da válvula borboleta.	30
Figura 13 – Resposta da planta com a aplicação do primeiro método de Ziegler-Nichols.	32
Figura 14 – Oscilação sustentada com período P_{cr} . (P_{cr} é medido em segundos.).	33
Figura 15 – Hardware do controle das válvulas borboletas.	36
Figura 16 – Pedal de acelerador eletrônico.	37
Figura 17 – Válvulas borboletas eletrônicas.	38
Figura 18 – Sensor de pressão diferencial.	39
Figura 19 – Circuito integrado de ponte-H.	40
Figura 20 – Circuito integrado Ft232RL.	40
Figura 21 – Modelo da válvula borboleta.	43
Figura 22 – Ângulo de abertura inicial.	44
Figura 23 – Diagrama de blocos da válvula borboleta.	44
Figura 24 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle das Válvulas Borboletas.	45
Figura 25 – Gráfico gerado no LabVIEW com aplicação de um degrau de 3v.	47
Figura 26 – Gráfico exportado para o MATLAB.	47
Figura 27 – Pontos encontrados utilizando primeiro método de Ziegler-Nichols.	48
Figura 28 – Fluxograma do algoritmo de controle PID.	50
Figura 29 – Fonte de alimentação.	51
Figura 30 – Circuitos de potência pontes-H L6203.	52
Figura 31 – Circuito de comunicação serial.	53
Figura 32 – Esquema elétrico dos pinos do microcontrolador.	54
Figura 33 – Entradas dos conversores analógicos digitais.	56
Figura 34 – Fluxograma simplificado do controlador.	57

Figura 35 –Diagrama de blocos desenvolvido no LabVIEW.	59
Figura 36 –Instrumentos virtuais criados no LabVIEW.	59
Figura 37 –Gráfico resultante em malha fechada do pedal, válvula borboleta 1 e válvula borboleta 2.	60
Figura 38 – Gráfico resultante em malha fechada, com ajuste dos coeficientes.	61
Figura 39 – Placa de circuito impresso desenvolvida.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau unitário da planta.	33
Tabela 2–Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr}	34
Tabela 3– Ângulo obtidos com diferentes tensões aplicadas a válvula borboleta.	46
Tabela 4–Conexões dos pinos do microcontrolador.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

DBW – Sistema de controle eletrônico da válvula borboleta (Drive-by-wire)

CC – Corrente contínua

ECU – Unidade de Controle Eletrônico (Electronic Control Unit)

EGAS – Electronic GAS Pedal

LH – Limp Home

MAP – Sensor de Pressão Absoluta (Manifold Absolut Pressure)

MCI – Motores de Combustão Interna

PID – Proporcional, Integral, Derivativo

PMI – Ponto Morto Inferior

PMS – Ponto Morto Superior

PWM – Modulação de Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)

RPM – Rotações por Minuto

SMD – Surface Mount Device (Componente de montagem em superfície)

TPS – Sensor de posição da Válvula Borboleta (Throttle Position Sensor)

UART – Universal Asynchronous Receive Transmitter (Transmissor/Receptor Universal Assíncrono)

V – Volts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivos Gerais	13
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA – CICLO OTTO	16
2.1.1 Motores Boxer	18
2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	19
2.2.1 Sistema de Alimentação por Carburador	20
2.2.2 Sistema de Alimentação por Injeção Eletrônica	21
<i>2.2.2.1 – Injeção Eletrônica Programável</i>	<i>22</i>
2.3 A RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL	23
2.4 O SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR	24
2.4.1 Sensores do Sistema de Admissão de Ar	25
<i>2.4.1.1 Sensor do Pedal de Acelerador Eletrônico</i>	<i>25</i>
<i>2.4.1.2 Sensor de Posição Angular da Válvula Borboleta (TPS)</i>	<i>26</i>
<i>2.4.1.3 Sensor de Pressão Absoluta (MAP)</i>	<i>27</i>
2.5 A VÁLVULA BORBOLETA	28
2.5.1 Funcionamento do Sistema DBW (Drive-By-Wire)	29
2.6 TÉCNICAS DE CONTROLE	31
2.6.1 Sintonia de controladores PID	31
2.6.2 Métodos de Ziegler-Nichols	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35

3.1 DESCRIÇÃO GERAL	35
3.1.1 Descrição do hardware para o controle das Válvulas Borboletas	35
3.1.2 Softwares utilizados.....	36
3.2 COMPONENTES DO SISTEMA.....	37
3.2.1 Pedal do Acelerador	37
3.2.2 Válvulas Borboletas.....	38
3.2.3 Sensor de Pressão Diferencial.....	38
3.2.4 Ponte-H.....	39
3.2.5 Comunicação Serial.....	40
3.2.6 Microcontrolador.....	41
<i>3.2.6.1 Escolha do Microcontrolador</i>	<i>41</i>
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	43
4.1 MODELO MATEMÁTICO DA VÁLVULA BORBOLETA	43
4.2 PROJETO DO CONTROLADOR	46
4.2.1 Determinação dos parâmetros.....	46
4.2.2 Controlador PID Digital	49
4.3 CIRCUITOS DESENVOLVIDOS.....	51
4.3.1 Fonte de alimentação.....	51
4.3.2 Circuitos de acionamento das válvulas borboletas.....	52
4.3.3 Comunicação Serial.....	53
4.3.4 Microcontrolador.....	53
4.4 FIRMWARE.....	56
4.4.1 Estratégia no Controle das Válvulas Borboletas	58
4.5 SOFTWARE SUPERVISÓRIO	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 PROGRAMA LABVIEW (SUPERVISÓRIO).....	60
5.2 HARDWARE ELETRONICO	61

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICE A - LEDS E CONECTORES NÃO APRESENTADOS NO DESENVOLVIMENTO.....	66
APÊNDICE B – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA.....	67
APÊNDICE C – INTERIOR DO CONTROLADOR	68
APÊNDICE D – COMPONENTES DO SISTEMA	69
ANEXO A – DATASHEET VÁLVULA BORBOLETA.....	70

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, microcontroladores, sensores e atuadores são os elementos responsáveis pelo crescimento em sistemas de controle eletrônico em veículos. De fato, isso possibilitou o surgimento de novas tecnologias no ramo automotivo, particularmente associadas a substituição de elementos mecânicos por eletrônicos, dessa forma obtendo uma melhoria no desempenho e confiabilidade dos veículos.

Na busca por melhorias no funcionamento e desempenho de motores preparados de alta performance, geralmente faz-se necessária a instalação de novos componentes para adequá-lo à nova potência, atendendo assim alguns requisitos básicos do motor a ser preparado.

O objetivo deste trabalho, é fazer o controle e acionamento de válvulas borboletas de admissão de modo eletrônico e independente para a correta equalização necessária para motores boxer, fazendo o uso de sensores de pressão ligados em ambos coletores de admissão para a correta calibração.

Porém, o sistema proposto só fará o acionamento das válvulas borboletas que controlam a quantidade de ar admitido para o motor. Para o funcionamento do motor é necessário, portanto, trabalhar em conjunto com um módulo de injeção eletrônica programável para fazer o controle da injeção do combustível e ponto de ignição do motor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo principal o acionamento e o correto controle de duas válvulas borboletas, para o correto funcionamento de um motor boxer em toda sua faixa de rotação.

A abordagem aplicada para esse propósito resultou no projeto e implementação de um controlador para as válvulas borboletas bem como no desenvolvimento de uma interface para comunicação entre o controlador e o operador.

1.1.2 Objetivos Específicos

- 1- Estudar o funcionamento em automóveis que utilizam válvulas borboletas eletrônicas;
- 2- Realizar um estudo dos sensores e componentes que serão utilizados no projeto e escolher as válvulas borboletas para o projeto proposto;
- 3- Realizar levantamento de dados dos sensores e componentes que serão utilizados;
- 4- Desenvolver o firmware do controlador para as válvulas borboletas;
- 5- Criar um software para ajuste, gerenciamento, teste dos sensores e equalização dos corpos de borboletas;
- 6- Implementar um sistema com redundância caso aconteça a perda do sinal entre o pedal do acelerador e as válvulas borboletas, as mesmas se abrem até um valor pré-determinado, desse modo permitindo que o veículo mesmo em baixa velocidade possa se locomover.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em motores originalmente alimentados a carburador, com o passar dos anos os componentes mecânicos que fazem parte dos carburadores apresentam folgas pelo uso comum do dia a dia. Essas folgas geralmente ocorrem nas buchas dos eixos das válvulas borboletas e terminais das varetas de acionamentos, desse modo, o motor apresenta dificuldade de equalização ficando com funcionamento deficiente em regime de aceleração e principalmente em marcha-lenta. Esse é o caso dos motores boxer alimentados com dupla carburação.

Outro fator é o cabo que liga o pedal do acelerador ao acionamento das válvulas borboletas. Com o movimento de vai e vem dentro do conduíte o cabo desgasta-se e tende a agarrar, apresentando certa resistência ao movimento podendo este vir a romper.

Diferentemente dos carburadores, os eixos das válvulas borboletas eletrônicas dificilmente apresentam folga pois são apoiados em rolamentos e tem-se a eliminação do cabo entre o pedal do acelerador e o acionamento das válvulas borboletas. Para este trabalho é proposto o controle das válvulas borboletas eletrônicas aplicáveis à motores boxer originalmente alimentados por dupla carburação, para eliminação dos inconvenientes descritos. A função das válvulas borboletas neste caso é fazer somente a admissão do ar.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O capítulo 1 introduz o projeto supracitado. No capítulo 2 é abordada a revisão bibliográfica realizada. Já o capítulo 3 apresenta as especificações do projeto. No capítulo 4 apresenta o desenvolvimento da proposta. No capítulo 5 são demonstrados os resultados obtidos. O capítulo 6 apresenta as considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Aqui serão abordados os assuntos mais importantes e demonstrado hipóteses onde serão desenvolvidas e analisadas a ideia principal deste relatório.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA – CICLO OTTO

O motor de combustão interna (MCI) de quatro tempos começou a ser concebido em 1862 pelo físico francês Alphonse Beau de Rochas que propôs as condições necessárias para que um MCI funcionasse com o máximo de economia possível. Rochas chegou a descrever uma sequência de eventos por meio da qual a economia e eficiência poderiam ser conseguidas. Esta sequência, que totaliza 4 tempos, é o que ocorre basicamente em todo MCI. Porém, Rochas não chegou a construir nenhum motor, apenas concebeu e formulou as condições de funcionamento econômico ao qual havia imaginado. Apenas em 1872 foi construído o primeiro motor experimental e posto em funcionamento somente em 1876 por Nikolaus Otto, que foi quem determinou também o ciclo teórico sob o qual trabalha o MCI. O motor Otto ficou conhecido popularmente somente quando a firma Alemã Otto e Langen passou a fabricá-los. A Figura 1 ilustra os principais componentes de MCI de ciclo Otto (PASSARINI, 1993; DIAS, 2015).

Figura 1 – Principais componentes de um motor de combustão de ciclo Otto.

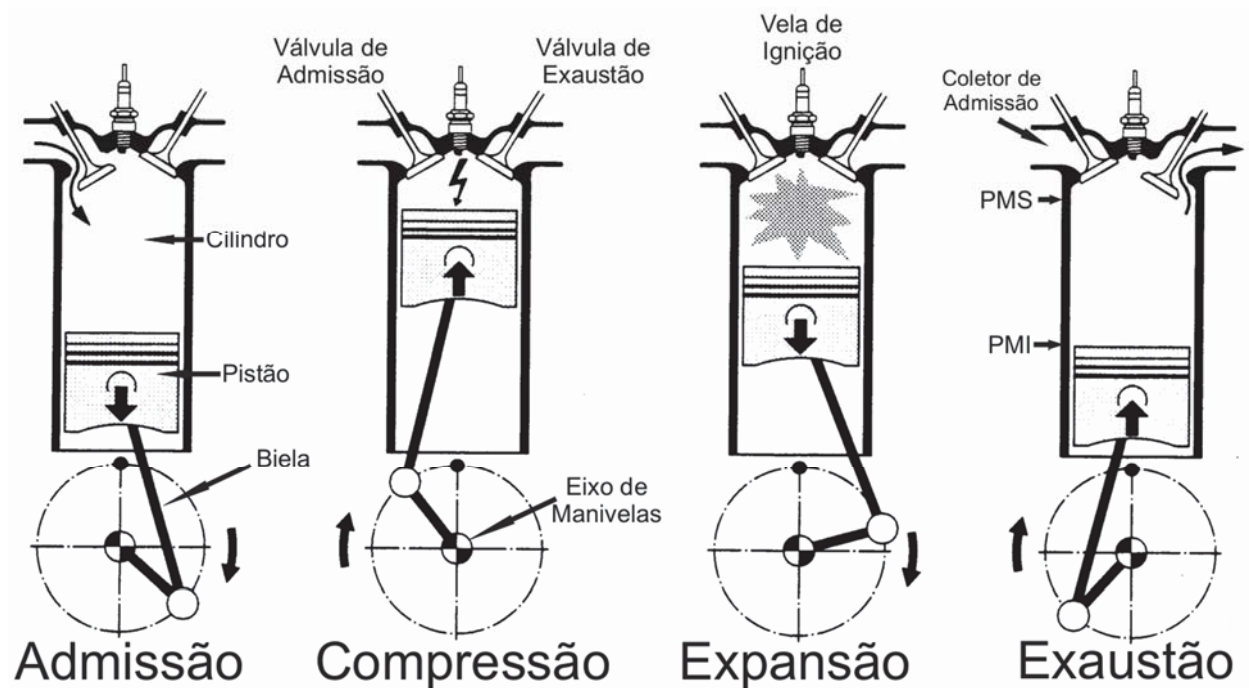


Fonte: (DIAS, 2015).

No MCI um ciclo de trabalho corresponde a duas voltas na árvore de manivelas. A árvore de manivelas (ou virabrequim) realiza um movimento rotacional e as bielas são responsáveis por transferir o movimento da árvore de manivelas para os pistões que fazem um movimento retilíneo do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI). Com as duas voltas na árvore de manivelas, quatro tempos são executados dentro de um cilindro (MILHOR, 2002).

Pela Figura 2 os quatro tempos do MCI podem ser melhor visualizados:

Figura 2 – Tempos do motor de ciclo Otto.



Fonte: (ADLER, 1988; BRAGA, 2007).

Cada cilindro possui um conjunto de válvulas de admissão e de escape. Estas válvulas são acionadas pela árvore de comando de válvulas, que por sua vez é movido através da árvore de manivelas. A válvula de admissão é responsável por admitir a mistura de ar-combustível em motores de injeção indireta, e a válvula de escape por liberar os produtos da combustão desta mistura admitida. A quantidade de válvulas por cilindro pode variar dependendo do modelo do motor e fabricante. Os quatro tempos do MCI de ciclo Otto são:

Admissão: No momento da admissão o pistão se desloca dentro do cilindro do PMS para o PMI. A válvula de admissão se abre para admitir a mistura ar-combustível para dentro do cilindro e a válvula de escape permanece fechada.

Compressão: No momento da compressão o pistão realizará o movimento do PMI para o PMS com as válvulas de admissão e escape ambas fechadas. Dessa forma, comprimindo toda a mistura admitida na câmara de combustão dentro do cilindro. Antes do pistão atingir completamente o PMS, o sistema de ignição produz uma centelha através da vela de ignição, causando a queima da mistura comprimida na câmara de combustão do cilindro, elevando a pressão dentro do cilindro.

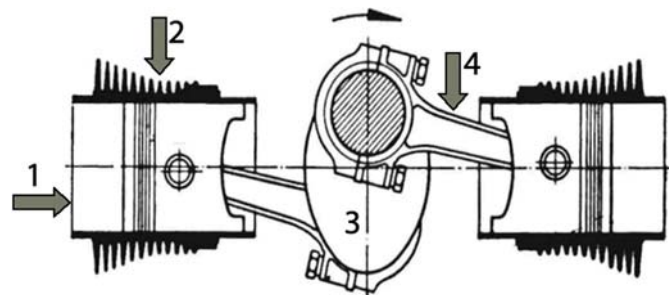
Expansão: A alta pressão causada pela queima da mistura faz com que o pistão se desloque do PMS para o PMI, com as válvulas ainda fechadas. É na expansão que a energia do combustível é extraída e convertida em movimento.

Exaustão: Na exaustão a válvula de escape se abre e o pistão realiza o deslocamento do PMI para o PMS, expelindo para a atmosfera o resultado da queima da mistura ar-combustível, finalizando o quarto tempo. Ao final deste ciclo se inicia novamente o primeiro ciclo.

2.1.1 Motores Boxer

O motor Boxer, é uma espécie de MCI cujos cilindros são montados contrapostos, fazendo seus pistões trabalharem paralelamente ao solo, na horizontal, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 –Disposição dos componentes em um motor Boxer. Onde: 1-Pistão; 2-Cilindro; 3- Árvore de manivelas; 4-Biela.



Fonte: Adaptado de FACA VOCEMESMO, 2008.

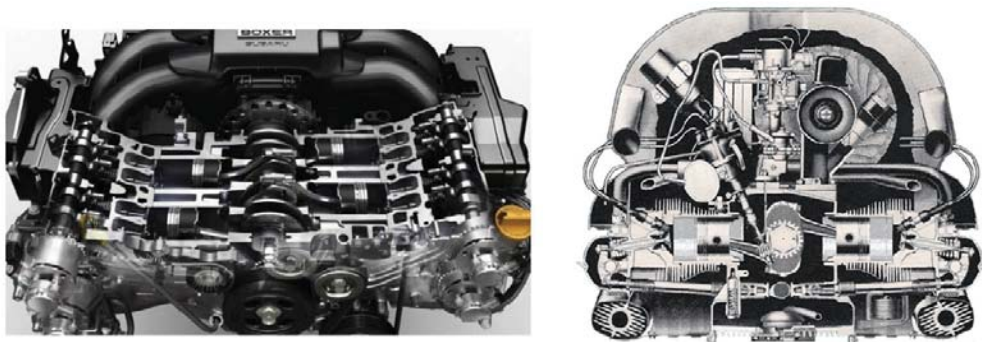
A Volkswagen foi a primeira a aplicar um motor Boxer em um veículo, mas muitas outras montadoras utilizaram em seus veículos como a Citroën, Alfa Romeo, Ford, Tatra,

Gurgel, Porsche e Subaru. Atualmente para veículos leves, somente a Porsche e a Subaru fabricam, em versões de 4 e 6 cilindros.

O motor Boxer, é um motor que tem algumas vantagens como baixo centro de gravidade, baixa vibração pois o sentido de movimento dos cilindros em sentidos opostos ajuda a reduzir o índice de vibrações, trazendo, portanto, mais suavidade no seu funcionamento.

Motores de cilindros opostos também costumam apresentar complexidade maior que os tradicionais em linha. Como no caso dos motores com cilindros em V, eles precisam de dois cabeçotes e de todas as partes mecânicas associada a estes. Na Figura 4 é apresentado um motor de fabricação atual da Subaru e um de fabricação da Volkswagen dos anos 70.

Figura 4 –Motores Subaru e Volkswagen.



Fonte: Adaptado de FLATOUT, 2016.

2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O MCI possui sistemas periféricos, como os sistemas de alimentação, ignição e arrefecimento, que são indispensáveis para seu funcionamento. Esses sistemas, ao longo dos anos, sofreram modificações que possibilitaram o aumento de eficiência, permitiram o monitoramento do motor durante seu funcionamento e a capacidade de adaptação a diferentes condições de trabalho.

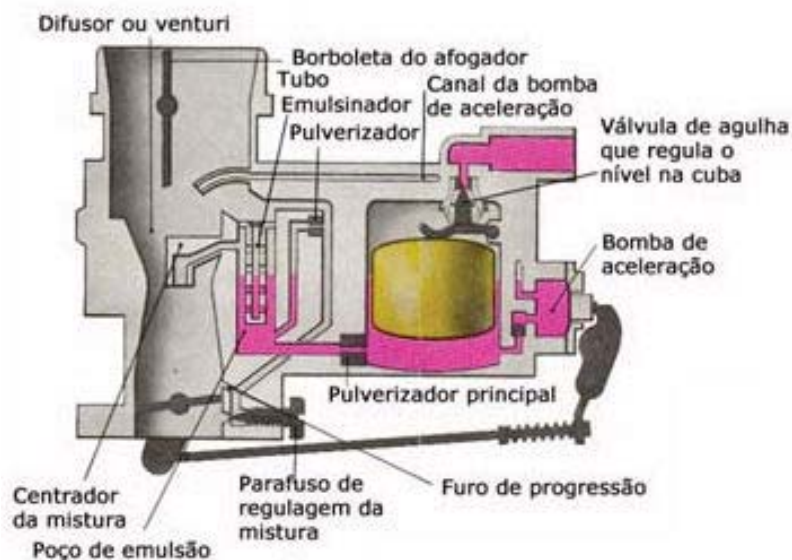
O sistema de alimentação dos MCI é responsável por enviar o combustível até a câmara de combustão. Os sistemas de alimentação nos motores se dividem em alimentação por carburador ou alimentação por injeção eletrônica, apresentados a seguir.

2.2.1 Sistema de Alimentação por Carburador

O sistema de alimentação por carburador teve em seu início um funcionamento puramente mecânico, o qual foi recebendo atualizações com a implementação de componentes eletrônicos até ser totalmente substituído pelo sistema de injeção eletrônica, presente na quase totalidade dos veículos comercializados atualmente.

O carburador, tem a função de realizar a mistura do ar e do combustível controlando a dosagem de combustível que é enviada ao motor de acordo com seu nível de carga. A mistura do ar e do combustível é realizada no tubo de Venturi, onde o ar admitido é acelerado e arrasta o combustível contido em uma cuba (Figura 5). Essa diferença de pressão faz com que o combustível seja arrastado pelo circuito principal de alimentação e misturado com o ar. Uma borboleta de aceleração controla a quantidade de ar e combustível que é admitida no motor, aumentando ou diminuindo sua rotação e potência.

Figura 5 – Diagrama de um carburador de corpo simples.



Fonte: Adaptado de OFICINA&CIA, 2002.

Os carburadores por serem dispositivos mecânicos não permitem verificar as condições de queima do combustível dentro dos cilindros, e com novas legislações ambientais a indústria nos últimos anos vem cada vez mais buscando desenvolver motores com melhor consumo de combustíveis e menor taxa de emissão de poluentes, dessa forma foi inevitável a substituição do carburador dos automóveis por um sistema de gerenciamento eletrônico para fazer a injeção de combustível.

2.2.2 Sistema de Alimentação por Injeção Eletrônica

O sistema de injeção eletrônica de combustível consiste de uma ECU (*Electronic Control Unit*) que coleta informações de diversos sensores instalados no motor e de posse dessas informações calcula a quantidade de combustível que deve ser admitida pelo motor em determinada condição de funcionamento.

A ECU faz a leitura do sensor de pressão do coletor de admissão, juntamente com o sensor de temperatura do ar que está sendo admitido, para calcular a massa de ar que é admitida pelo motor. Com o aumento da vazão da massa de ar e de combustível, ocorre o aumento da rotação do motor, cuja relação entre eles é dada na equação (1) (DELPHI, 2003; GUEDES, 2014).

$$V_{ma} = n_{cil} * \frac{p}{r * t} * c * \frac{RPM}{120} \quad (1)$$

Onde,

- V_{ma} é a vazão da massa de ar
- n_{cil} é o número de cilindros do motor
- p é a pressão do ar admitido
- r é a constante de gás
- t é a temperatura do ar
- c é a cilindrada do motor
- RPM é a rotação do motor

Caso a temperatura do ar admitido aumenta, a vazão da massa de ar diminui e se a pressão aumenta há o aumento na vazão da massa de ar. A ECU determina a quantidade de combustível a ser injetada com base na quantidade de massa de ar admitido, que está diretamente relacionada à abertura da válvula borboleta.

No sistema de injeção eletrônica o combustível é pressurizado por uma bomba e o mesmo é entregue ao motor por eletroválvulas localizadas próximas as válvulas de admissão do motor. Esse sistema apresenta a vantagem de o combustível ser melhor pulverizado no ar e com isso se atinge uma melhor atomização da mistura ar-combustível. Apresenta também a vantagem de possuir um melhor controle da relação ar combustível de acordo com as condições de funcionamento do motor. Esse controle permitiu reduzir e controlar de uma forma muito

mais precisa tanto o consumo de combustível como as emissões de gases poluentes. Com o surgimento do gerenciamento eletrônico de MCI, através da injeção e ignição eletrônica foi possível obter as seguintes vantagens (CAMARA, 2006):

- Melhor rendimento;
- Menor consumo de combustível;
- Maior confiabilidade;
- Menor necessidade de manutenção;
- Partidas mais fáceis a qualquer temperatura;
- Facilidade na manutenção.

2.2.2.1 – Injeção Eletrônica Programável

Os sistemas de injeção/ignição eletrônica programáveis funcionam da mesma forma que os sistemas de injeção/ignição convencionais. Aplicam os mesmos atuadores e sensores conhecidos, mas o diferencial das injeções programáveis é que permitem a criação e a modificação de todo o mapa de injeção e ignição em tempo real. Como em qualquer modificação feita em um motor para aumento de potência, seja com o aumento da cilindrada, troca de comando de válvulas, aumento da taxa de compressão ou qualquer outra modificação do tipo, é necessário modificar todo o mapa de injeção e ignição para fornecer a correta quantidade de combustível e o avanço de ignição ideal para a nova condição do motor.

A Megasquirt é uma injeção/ignição eletrônica digital totalmente programável em tempo real, sendo necessário conectá-la a um computador ou um notebook para as devidas configurações e acertos dos mapas de injeção/ignição. A Megasquirt é um projeto aberto a comunidade (open source) e utiliza um processador de 8 bits (MegaSquirt I) e 16 bits (MegaSquirt II, III, IV) para fazer o controle e ajustes, fazendo o motor funcionar corretamente. O processador realiza a leitura de sensores e sinais (temperatura, rotação, pressão). Na sequência consulta os dados armazenados em cada tabela (mapa) de injeção/ignição, e aplica as devidas correções calculando o tempo exato da injeção e o avanço da ignição. A megasquirt utiliza um programa que configura esse projeto (TunerStudio), mostrando os relógios de RPM, temperatura do ar, água, para ser feita a visualização e os ajustes em tempo real.

2.3 A RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL

Um fator muito importante para o bom desempenho e funcionamento do MCI é a relação de ar-combustível. O motor exige determinada razão dessa mistura nos diferentes regimes de trabalho, garantindo o correto funcionamento do motor desde a marcha-lenta até a situação de plena carga, procurando sempre garantir economia de combustível e eficiência do motor. Os sistemas de injeção buscam alcançar o balanceamento desta razão de ar-combustível, que também é conhecida como mistura estequiométrica. (VEIGA, 2010).

No Brasil, a gasolina E27 (mistura de gasolina e 27% de Etanol anidro) ou conhecida também como gasolina brasileira e o álcool hidratado (96% Etanol e 4% Água) são os combustíveis mais utilizados nos veículos com motores de ciclo Otto. A mistura estequiométrica (razão ar-combustível), apropriada para se ocorrer uma combustão completa, é de 14,7:1 para gasolina pura, aproximadamente 12,9:1 para a gasolina E27 e 9:1 para álcool etílico (PASSOS, 2015).

A ECU calcula constantemente a quantidade de combustível que deve ser injetado, ou seja, está programada para sempre buscar a mistura estequiométrica. Quando uma mistura possui excesso de oxigênio, ela é denominada uma mistura pobre, e quando possui excesso de combustível ela é denominada uma mistura rica. Quando a medida de oxigênio e combustível está ideal, ou seja, lambda igual a 1 ($\lambda=1$) ela é estequiométrica. Lambda é determinado pela razão entre a mistura ar-combustível real, e a mistura ar-combustível estequiométrica, conforme a equação 2.

$$\lambda = \frac{(ar/combustível)_{real}}{(ar/combustível)_{estequiométrica}} \quad (2)$$

É de extrema importância obter o fator lambda para o sistema de injeção de combustível, pois somente através dele é possível determinar a correção da mistura de ar-combustível. Para o sistema de injeção determinar o valor de λ é utilizado um sensor conhecido como Sonda Lambda ou Sensor de Oxigênio (Figura 6). Este sensor é instalado no escapamento e gera uma tensão inversamente proporcional à quantidade de oxigênio nos gases de escape, não importando qual o combustível é utilizado, o sistema de injeção realizará a análise desta mistura determinando se ela é pobre, estequiométrica ou rica para determinar a quantidade de combustível a ser injetada (WILDNER, 2006; VEIGA, 2010).

Figura 6 – Sonda Lambda.



Fonte: O Autor.

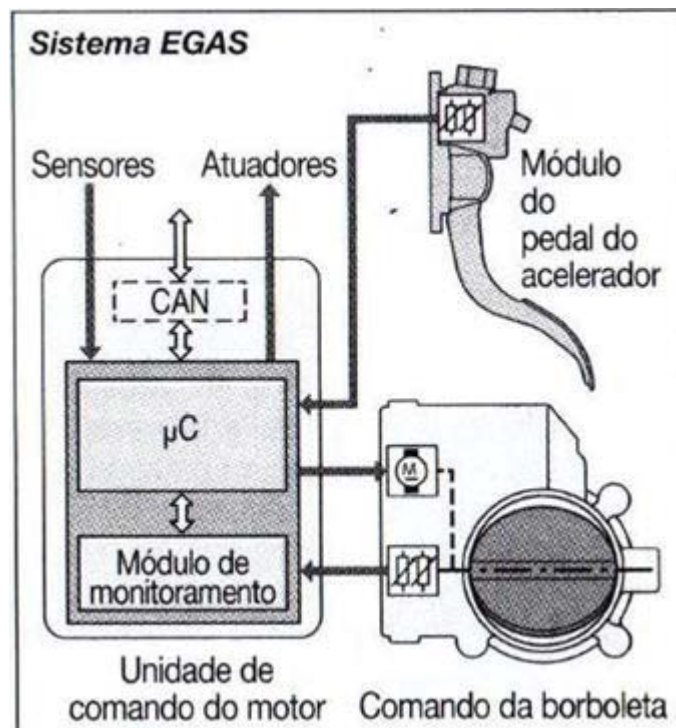
2.4 O SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR

Um dos elementos mais importantes para o correto funcionamento do MCI é o sistema de admissão de ar. Ele é composto pela válvula borboleta, coletor de admissão, filtro e canos condutores de ar. O principal componente é a válvula borboleta que determina a quantidade de ar a ser admitido pelo motor, em resposta ao sinal do pedal do acelerador (BOSCH, 2005; PUJATTI, 2007).

Nos antigos MCI, a quantidade de ar admitida pela válvula borboleta era controlada por um cabo mecânico ligado ao pedal do acelerador. Esta configuração era utilizada tanto em motores carburados como nos primeiros sistemas de injeção eletrônica. Com a evolução do sistema de gerenciamento eletrônico, foi implementado também um controle eletrônico para a válvula borboleta, que é conhecido também como EGAS. Este sistema permitiu uma maior precisão para o cálculo da vazão de massa de ar admitido para o sistema de gerenciamento injetar o combustível nos instantes adequados e determinar também os mapas de ignição. No sistema EGAS o controle da válvula borboleta acontece via *drive-by-wire* (DBW), ou seja, o sistema de cabo mecânico que acionava a válvula borboleta através do pedal acelerador, foi substituído por um sistema eletrônico, em que a válvula borboleta é acionada eletronicamente

pelo pedal de acelerador eletrônico. O sistema EGAS é composto por um microcontrolador que recebe os dados dos sensores e atuadores, e o processamento da ECU e determina o ângulo de abertura da válvula borboleta para determinado momento de operação do MCI. O sensor TPS realimenta o microcontrolador através de um módulo de monitoramento para realizar o controle e ajuste correto do ângulo de abertura (BOSCH, 2005; GUEDES, 2014). A Figura 7 mostra o diagrama de um sistema EGAS.

Figura 7 – Diagrama sistema EGAS.



Fonte: (BOSCH, 2005; GUEDES, 2014).

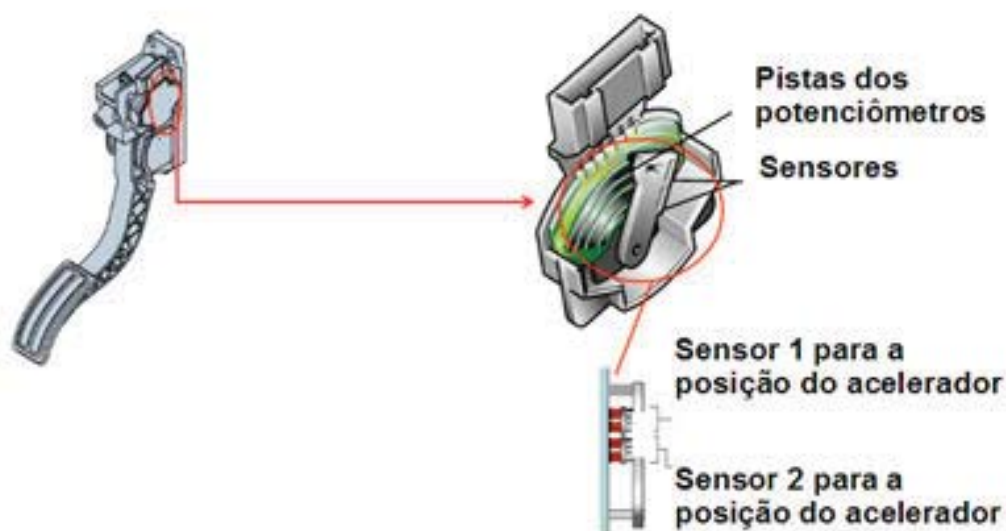
2.4.1 Sensores do Sistema de Admissão de Ar

2.4.1.1 Sensor do Pedal de Acelerador Eletrônico

O sensor de posição do pedal está localizado junto ao pedal do acelerador. É constituído por geralmente dois potenciômetros independentes que traduzem a posição de acionamento do pedal em sinal elétrico, enviando-o a ECU. São utilizados dois potenciômetros por motivos de segurança para dar redundância a uma função de vital importância para o funcionamento do

motor do automóvel. Os dois potenciômetros usam curvas de respostas opostas, ou seja, o valor da tensão de um potenciômetro aumenta, e o valor da tensão do outro potenciômetro diminui conforme o acionamento do pedal. A tensão máxima aplicada nos potenciômetros na maioria dos casos é de 5 volts para que a ECU possa obter a sua leitura de forma segura. A Figura 8 mostra um pedal de acelerador eletrônico, onde é possível ver as pistas dos dois potenciômetros.

Figura 8 – Pedal de acelerador eletrônico.



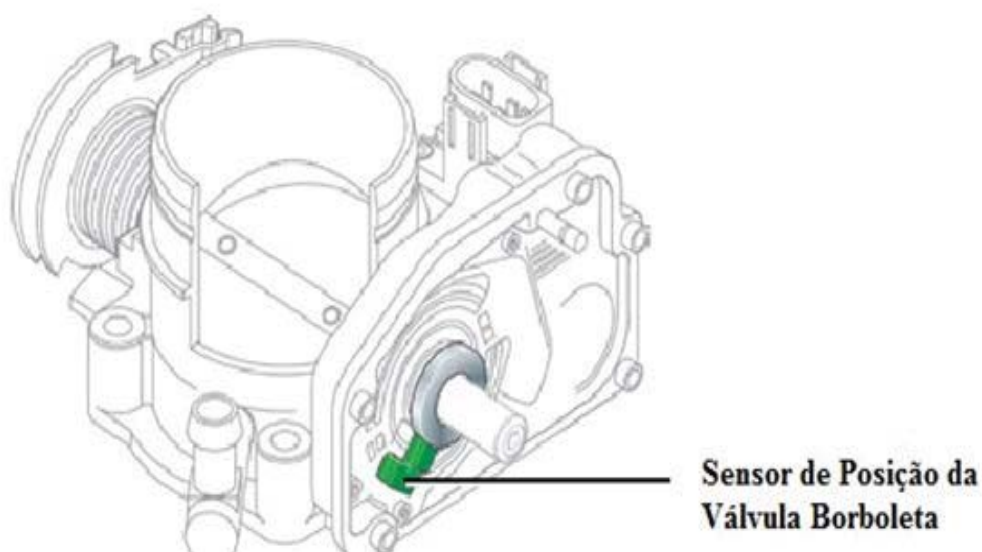
Fonte: Adaptado de VOLKSWAGEN, 2009.

2.4.1.2 Sensor de Posição Angular da Válvula Borboleta (TPS)

O sensor de posição angular da válvula borboleta TPS (*Throttle Position Sensor*) se encontra no eixo angular da válvula borboleta e é responsável por indicar o ângulo de abertura da válvula borboleta, fornecendo assim uma realimentação para a ECU executar o seu controle adequado. O sensor de posição da válvula borboleta é constituído de dois potenciômetros (TPS1 e TPS2) com funcionamento similar aos do sensor do pedal. Conforme acontece a variação rotacional da válvula borboleta um sinal aumenta e o outro sinal diminui o nível de tensão. Ambos os sinais dos sensores possuem linearidade com relação ao ângulo de abertura da válvula borboleta, dessa forma a ECU é capaz de detectar falhas nesses sensores em caso de discrepância entre os sinais utilizando o recurso da tensão média entre

os sinais, podendo identificar algum tipo de falha no sensor e com isso tomar ações apropriadas com o intuito de tentar controlá-la mesmo com um sinal avariado (BOSCH, 2005; DELPHI, 2003; GUEDES, 2014). A Figura 9 mostra um corpo de válvula borboleta onde é o possível ver onde fica posicionado o sensor de posição.

Figura 9 – Corpo de Borboleta com destaque no sensor de posição.



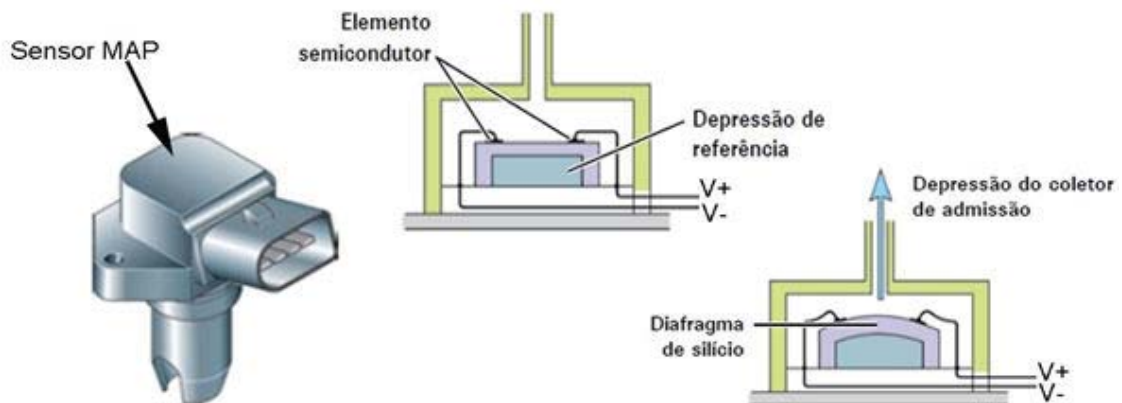
Fonte: (DIAS, 2015).

2.4.1.3 Sensor de Pressão Absoluta (MAP)

O sensor *Manifold Absolut Pressure* (MAP) é responsável pela medição da variação de pressão absoluta no coletor de admissão. Baseado num material piezo resistivo fixado a um diafragma de silício que com o diminuição da pressão no coletor de admissão, o diafragma se movimenta gerando uma deformação nos piezos resistores que, por sua vez, alteram a resistência do seu material. A pressão interna no coletor age sobre o diafragma, causando a sua deformação e como o elemento semicondutor está integrado ao diafragma, acaba por se deformar também, conjuntamente, variando seu valor de resistência e que ao passar por um circuito de condicionamento eletrônico, gera uma alteração na tensão de saída. A relação da pressão aplicada no sensor e a tensão elétrica que o mesmo fornece são linearmente proporcionais. Este fator facilita o cálculo da pressão no coletor de admissão para o sistema

de gerenciamento do motor (DIAS, 2015). Na Figura 10 é apresentado o sensor de pressão absoluta.

Figura 10 - Sensor de pressão absoluta.



Fonte: (DIAS, 2015).

Normalmente este sensor é instalado no coletor de admissão de ar e é de fundamental importância para a determinação da massa de ar admitida pelo MCI. Estes sensores permitem medidas de pressão de acordo com cada sistema automotivo projetado, existindo uma diversidade de modelos do mesmo sensor para cada situação (DIAS, 2015).

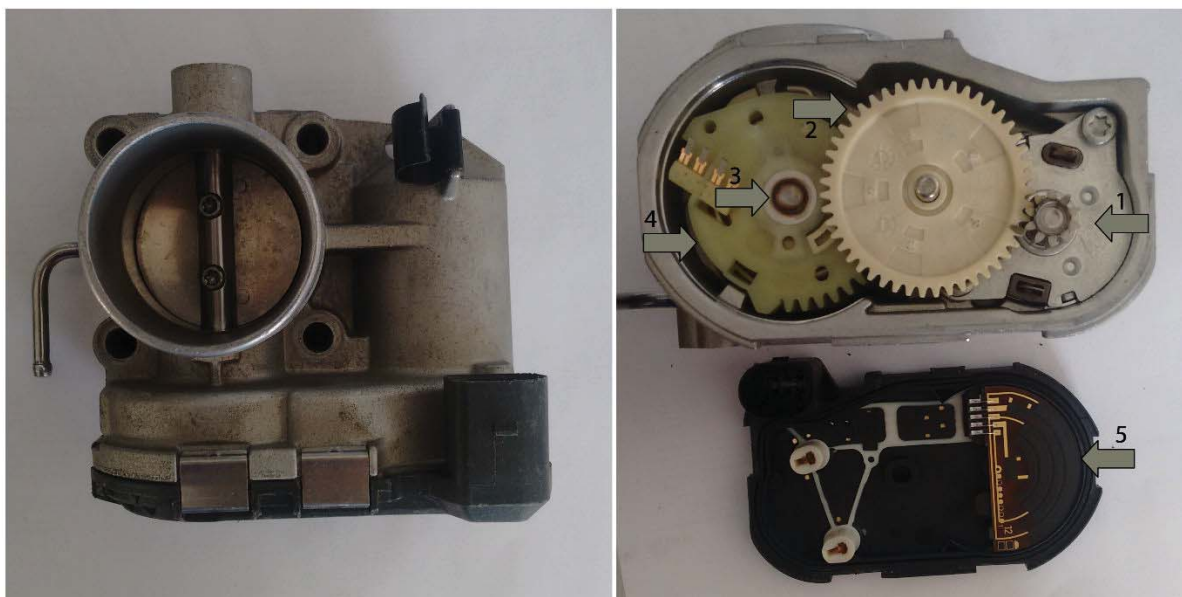
2.5 A VÁLVULA BORBOLETA

Em sistemas mecânicos, o ângulo de abertura da válvula é determinado diretamente pelo motorista, através de um cabo de aço ligado ao pedal do acelerador. Em sistemas eletrônicos, a válvula borboleta é controlada indiretamente pelo motorista, pois é controlada pela unidade de gerenciamento eletrônico do motor. A vazão da massa do ar está totalmente relacionada com o ângulo de abertura da válvula borboleta, pois variando a área efetiva de passagem o fluxo de massa de ar aumenta proporcionalmente.

Atualmente os veículos fabricados em quase a sua totalidade já dispõem do sistema *drive-by-wire* (DBW). Desenvolvido para ser utilizada na fórmula 1, e posteriormente aplicada em um BMW Série 7 pela primeira vez em 1988 (SHARP, 2016). A princípio o sistema DBW

foi criado para somente eliminar a ligação do cabo que liga o pedal do acelerador a válvula borboleta, e posteriormente com o intuito de proporcionar uma melhor eficiência do motor visando atender as legislações ambientais. Facilitou porém a implementação de novas tecnologias como sistemas inteligentes para direção como o piloto automático, controle de tração e outros. O corpo da válvula borboleta eletrônico é formado por geralmente dois potenciômetros para indicar a posição angular da abertura da válvula borboleta, um motor CC, molas de retorno e engrenagens de transmissão (BOSCH, 2005). A Figura 11 apresenta uma válvula borboleta eletrônica normalmente utilizada em veículos de passeio.

Figura 11 – Corpo de válvula borboleta eletrônica. Onde: 1-Motor CC; 2-Engrenagens; 3-Eixo da válvula borboleta; 4-Mola; 5-Potenciômetros.



Fonte: O Autor.

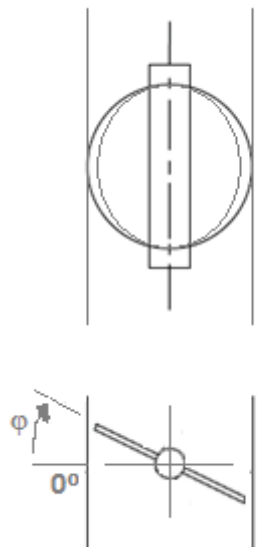
2.5.1 Funcionamento do Sistema DBW (Drive-By-Wire)

Quando o pedal do acelerador é acionado, um sinal é enviado para a ECU indicando a posição do pedal e de acordo com a sua posição, é gerado o sinal de acionamento. Para facilitar o controle é utilizada uma tensão média gerada por um PWM (Pulse Width Modulation). O PWM é um sinal pulsado que possui uma modulação que modifica a tensão média na saída, para controlar a tensão no motor CC que faz o acionamento da válvula borboleta, ou seja, realiza o movimento do prato da válvula alterando a abertura da válvula borboleta. O sinal PWM é aplicado a uma ponte-H, que é um circuito de potência formado por transistores que fornecem

a corrente necessária para o correto acionamento do motor CC, e que permitem a passagem da corrente em ambos os sentidos fazendo com que o motor se movimente em qualquer direção, abrindo ou fechando a válvula borboleta. No momento em que a posição angular da válvula borboleta é alterada, este movimenta a posição dos potenciômetros que informam a ECU sua posição. Na sequencia o sinal PWM é modificado para que a posição da válvula seja a mesma determinada pelo pedal do acelerador.

Quando o motor da válvula borboleta está desativado, a borboleta assume uma posição predefinida com um ângulo ϕ de 11° a 20° pela ação de duas molas de retorno conforme a Figura 12. Para abrir a borboleta com um ângulo maior, a ECU aumenta o ciclo do sinal do PWM. Para fechar a borboleta e regular a marcha lenta, a polaridade do sinal de acionamento é invertida. Caso um dos potenciômetros do pedal venha a falhar a ECU perderá uma referência mas o acelerador funcionará normalmente pelo outro potenciômetro, e será gravado um código de defeito correspondente na memória da ECU e a lâmpada do sistema de injeção ficará acesa. Porém, se a falha ocorrer simultaneamente nos 2 potenciômetros a ECU desativa a ponte-H, fazendo a válvula borboleta voltar a condição de repouso, o motor então ficará com uma rotação entre 1500 e 1800 rpm. Esta é a posição chamada Limp Home (LH), que é uma posição neutra ou de segurança. (OFICINABRASIL, 2014).

Figura 12 – Ângulo inicial da válvula borboleta.



Fonte: O Autor.

O controle da válvula borboleta não depende apenas da posição do pedal que a controla. Como é a ECU que recebe o sinal do pedal, antes de determinar o nível da abertura da borboleta

ela também analisa outras informações sobre o funcionamento do veículo, como a rotação do motor, velocidade, temperatura do motor. Nessas condições a ECU consegue estabelecer a aceleração ideal para se obter o máximo de desempenho do motor, dessa forma aliando maior economia e menor emissões de poluentes, além de outras funções.

2.6 TÉCNICAS DE CONTROLE

2.6.1 Sintonia de controladores PID

A grande dificuldade encontrada com a utilização de controladores PID é a escolha dos valores adequados dos seus coeficientes proporcional (P) , integral (I) e derivativo (D). Tais valores são decisivos na tentativa de se obter um sistema estável, alcançando as melhores respostas transitórias e de regime possíveis. Segundo OGATA (2010), a equação de um controlador PID é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Onde $u(t)$ é a saída do controlador, $e(t)$ é o sinal do erro atuante, K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integrativo, e T_d é o tempo derivativo. A sua função de transferência é:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4)$$

A aplicabilidade dos controles PID torna este método de controle muito útil para a maioria dos sistemas de controle, principalmente no caso de não ser conhecido o modelo matemático da planta, impossibilitado o uso de métodos analíticos. Isso porque a maioria dos controladores PID são ajustadas em campo, com o uso de diferentes tipos de regras de sintonia. Dentre elas a mais usada é a regra de sintonia de Ziegler-Nichols.

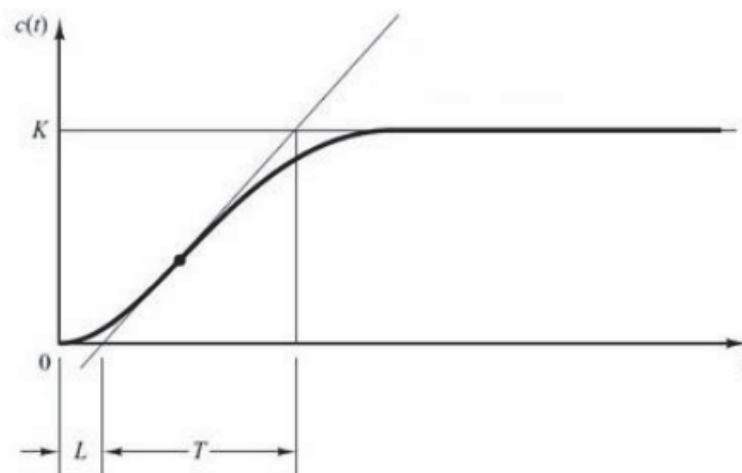
2.6.2 Métodos de Ziegler-Nichols

Quando o modelo matemático da planta é conhecido ou pode ser obtido, é possível então a aplicação de diversas técnicas de projeto para determinar os parâmetros do controlador PID, atendendo às especificações de regime transitório e permanente do sistema de malha fechada. Porém, quando o modelo matemático da planta não pode ser obtido, temos que recorrer a métodos experimentais de sintonia do controlador PID.

Ziegler e Nichols sugeriram métodos para a sintonia de um controlador PID baseados em respostas experimentais do sistema. Esses métodos sugerem valores para K_p , T_i e T_d que proporcionam uma operação estável do sistema. “Contudo, o sistema resultante pode exibir um sobressinal máximo grande na resposta do degrau, o que é inaceitável.” (OGATA, 2010). Assim, é necessário fazer uma sintonia fina para que seja atingido um resultado aceitável, sendo que as regras de sintonia de Ziegler-Nichols servem como base, e não como valores definitivos, para os parâmetros do controlador PID. Os dois métodos de sintonia de Ziegler-Nichols são:

Primeiro método: Com o sistema em malha aberta, é obtida a resposta da planta com a aplicação de um degrau unitário. O próximo passo é analisar a resposta do processo a esta perturbação, medindo a taxa de variação e o tempo morto, ilustrados na Figura 13. Essa curva de resposta normalmente tem o formato de um S. Este método pode ser utilizado quando as características da planta não variam em função do tempo.

Figura 13 – Resposta da planta com a aplicação do primeiro método de Ziegler-Nichols.



Fonte: OGATA, 2010.

Desenhando uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva encontrada, obtemos as constantes L e T . Dessa forma, calculamos os parâmetros do controlador PID segundo os valores da Tabela abaixo:

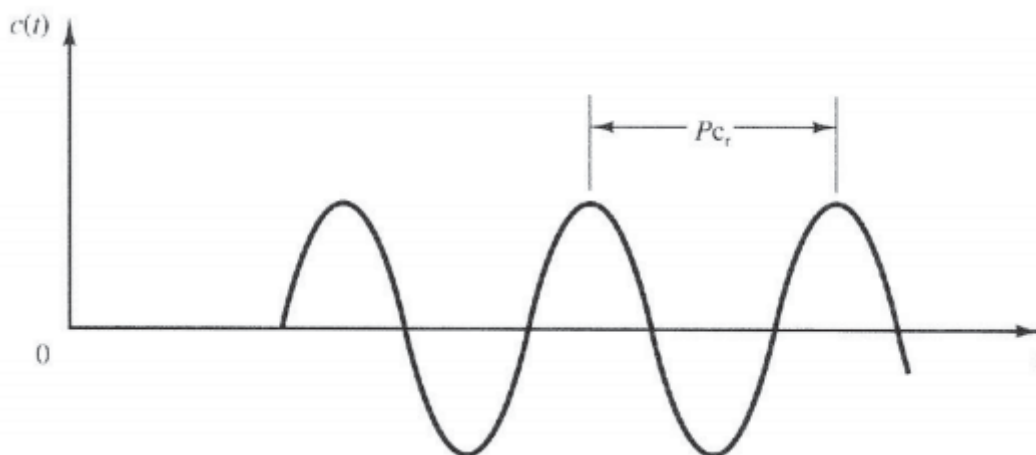
Tabela 1– Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau unitário da planta.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: OGATA, 2010.

Segundo método: Com o sistema em malha fechada, definimos $T_i=\infty$ e $T_d=0$, e usando apenas o controle proporcional, aumenta-se o K_p de zero ao valor crítico K_{cr} , quando a saída exibir uma oscilação sustentada pela primeira vez. Obtém-se então o ganho crítico K_{cr} e o período P_{cr} . Como vemos na figura abaixo:

Figura 14 – Oscilação sustentada com período P_{cr} . (P_{cr} é medido em segundos.).



Fonte: OGATA, 2010.

Assim, Ziegler e Nichols sugerem o cálculo dos parâmetros do controlador PID para o segundo método, segundo os valores da Tabela abaixo:

Tabela 2–Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: OGATA, 2010.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste capítulo é detalhar as características necessárias para a proposta deste trabalho, que tem como objetivo principal o controle das válvulas borboletas, aplicáveis em motores Boxer.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

Para o controle das válvulas borboletas será utilizado um microcontrolador que a partir do recebimento dos sinais dos sensores do pedal do acelerador e sensores das válvulas borboletas, enviará os sinais PWM para os dois circuitos de ponte-H, que controlaram a corrente dos motores CC das válvulas borboletas. Possui uma entrada de sinal para ajuste do ângulo inicial de marcha-lenta e um sensor de pressão diferencial que fará a medição da pressão dos coletores para realizar a equalização entre as válvulas borboletas.

O microcontrolador deve atender alguns requisitos mínimos conforme especificações dos níveis de tensão dos sensores, necessitando de oito canais conversores analógicos digitais, duas saídas PWM, quatro pinos de I/O e comunicação UART. No Subcapítulo 3.2.6 será melhor especificado.

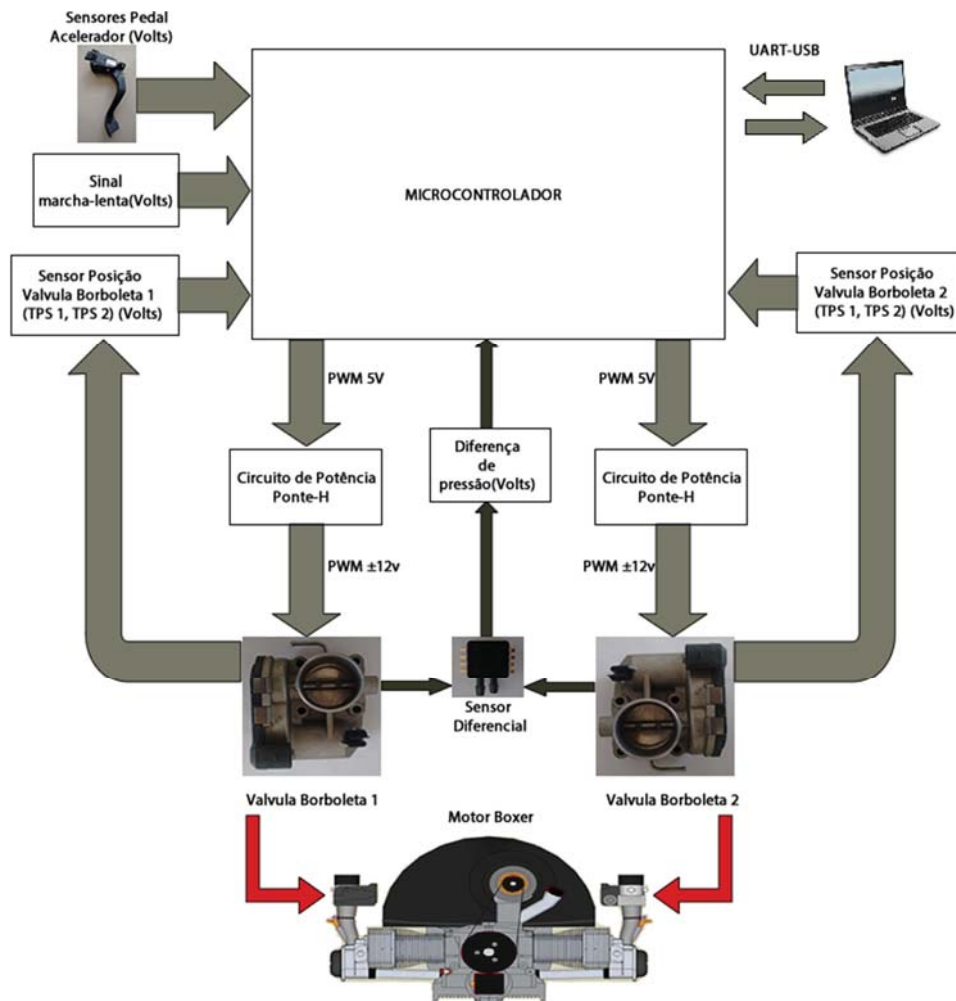
Utilizando *softwares* de apoio para o projeto do controlador das válvulas borboletas, foi adquirido a curva de resposta da válvula borboleta com a aplicação de um degrau de valor conhecido ao seu motor CC. Pelo processo transitório, a válvula borboleta abrirá até certo ponto, ao mesmo tempo é feita a aquisição do sinal de um dos seus potenciômetros. Com os dados adquiridos, os mesmos foram importados, tratados e apresentados graficamente para ser feita sua análise. De posse do gráfico gerado, e aplicando o primeiro método de Ziegler-Nichols, foi possível levantar seus parâmetros experimentais, para então serem aplicados ao microcontrolador. Posteriormente, os sinais dos sensores do pedal de acelerador, das válvulas borboletas e do sensor de pressão serão monitorados através de um programa supervisor.

3.1.1 Descrição do hardware para o controle das Válvulas Borboletas

O *hardware* para o controle das válvulas borboletas conforme pode ser visto na Figura 15, consiste nas entradas dos sinais dos sensores de TPS da válvula borboleta 1 e da válvula

borboleta 2, sensor de posicionamento do pedal do acelerador, sensor de pressão absoluta diferencial e entrada de sinal de marcha-lenta. O microcontrolador faz a leitura de todos esses sinais e define o ângulo de abertura das válvulas borboletas. Nas duas saídas PWM do microcontrolador são gerados os sinais com amplitude de 5 volts que são aplicadas nas entradas das pontes-H e pelo seu circuito de potência amplificam os sinais PWM para 12 volts em suas saídas para alimentarem os motores CC das válvulas borboletas 1 e válvula borboleta 2.

Figura 15 – Hardware do controle das válvulas borboletas.



Fonte: O Autor.

3.1.2 Softwares utilizados

Para a execução deste trabalho, foram utilizados diversos softwares de apoio. O compilador CCS 5.085 foi o ambiente de programação em linguagem C. Para programar o microcontrolador PIC foi utilizado o *software* MPLAB 8.92 da Microchip, juntamente como o

gravador PICKit3. O circuito e a placa do controlador das válvulas borboletas foram desenvolvidos no PROTEUS, *software* criado pela Labcenter Electronics. Para a aquisição dos sinais e monitoramento dos sensores, foi utilizado o *software* LabVIEW 13.0 *Student Version* da NATIONAL INSTRUMENT, sendo uma ferramenta bastante utilizada tanto para programação, como para tratamento e geração de sinais elétricos.

Para análise dos dados recebidos pelo LabVIEW, os dados foram importados, tratados e apresentados graficamente para uma melhor análise utilizando o *software* da MathWorks MATLAB R2012a.

3.2 COMPONENTES DO SISTEMA

3.2.1 Pedal do Acelerador

Os sensores do pedal de acelerador são compostos por dois potenciômetros. Esses sensores disponibilizam um sinal analógico em sua saída, referente às posições do pedal do acelerador. São alimentados com 5 Volts e os sinais fornecidos por eles são de 0.5 V a 4.20 V, sendo possível conecta-los diretamente nas devidas portas de entradas analógicas do microcontrolador sem o uso de circuitos condicionadores de sinal. O pedal de acelerador escolhido para a realização do protótipo é fabricado pela HELLA 6PV009.417-00, aplicado pela Fiat no veículo Strada, mostrado na Figura abaixo.

Figura 16 – Pedal de acelerador eletrônico.



Fonte: O Autor.

3.2.2 Válvulas Borboletas

Foram utilizadas duas válvulas borboletas, e cada válvula borboleta possui como sensor dois potenciômetros. Esses sensores disponibilizam um sinal analógico em sua saída, referente às posições das válvulas borboletas. São alimentados com 5 Volts e os sinais fornecidos por eles são de 0.7 V a 4.1 V, sendo possível conecta-los diretamente nas devidas portas de entradas analógicas do microcontrolador sem o uso de circuitos condicionadores de sinal. As válvulas borboletas utilizadas são de fabricação da BOSCH 0.280.750-255, com diâmetro de 44mm e frequência de operação entre 2KHz à 22KHz conforme o datasheet do fabricante (ANEXO A). Eram aplicadas pela General Motors no Veículo Corsa 1.4.

Figura 17 – Válvulas borboletas eletrônicas.



Fonte: O Autor.

3.2.3 Sensor de Pressão Diferencial

O sensor escolhido para a medição da pressão dos coletores para realizar a equalização foi o sensor MPXV7025DP da *Freescal*. Trata-se de um sensor de pressão absoluta com resposta linear, baixo custo e alta eficiência, e que pode ser conectado diretamente a porta analógica do microcontrolador sem necessidade de circuitos auxiliares. Opera em uma faixa de pressão de -25 a 25 KPa, que atende as necessidades do projeto. Sua alimentação é feita com 5 V e fornece em sua saída uma tensão de 0,2 V a 4,7 V.

Este sensor diferentemente dos outros possui duas entradas e mede a diferença de pressão entre elas fazendo uma leitura diferencial. As entradas do sensor serão conectadas em cada coletor de admissão, abaixo da válvula borboleta para ser feita a leitura da pressão, e caso tenha diferença de pressão entre os coletores será feita a compensação com a abertura ou fechamento das válvulas borboletas para que as pressões se igualem para que o motor permaneça equalizado.

Figura 18 – Sensor de pressão diferencial.

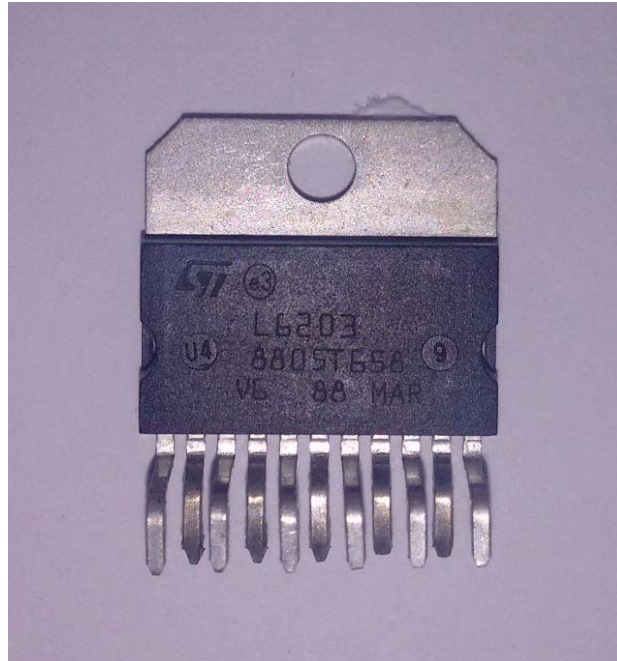


Fonte: O Autor.

3.2.4 Ponte-H

Em veículos de passeio, geralmente a corrente máxima do motor CC que aciona a válvula borboleta não ultrapassa a corrente de 2 A. A ponte-H MC33926 da *Freescale* foi projetada especificamente para uso automotivo para acionamento de válvulas borboletas, fornecendo corrente de até 3 A (GUEDES, 2014). Por ser de difícil obtenção já que é restrita a uso das indústrias automotivas, a escolha foi pela ponte-H L6203 fabricada pela *ST Microelectronics* que desempenha função muito semelhante à ponte-H MC33926. A ponte-H L6203 é de uso geral para acionamento de motores CC, fornecendo corrente de até 4 A. A utilização de circuitos integrados dedicado de ponte-H, se dá pelo fato de possuir toda a lógica de controle e potência internamente, substituindo transistores discretos e outros componentes, e além do mais pelo tamanho reduzido do componente. Foram utilizadas duas pontes-H, uma para cada válvula borboleta.

Figura 19 – Circuito integrado de ponte-H.



Fonte: O Autor.

3.2.5 Comunicação Serial

Para converter o sinal USB para sinal TTL, permitindo a comunicação entre o programa supervisor e o microcontrolador, foi utilizado o circuito integrado FT232RL da *FTDI* que realiza a conversão dos dados. Observa-se na Figura 20 o FT232RL.

Figura 20 – Circuito integrado Ft232RL.



Fonte: O Autor.

3.2.6 Microcontrolador

O microcontrolador deve possuir alguns requisitos mínimos conforme especificações dos níveis de tensão dos sensores. Serão necessários oito canais conversores analógico digital, sendo:

- Dois canais analógicos para os potenciômetros do pedal;
- Dois canais analógicos para TPS1 e TPS2 da válvula borboleta 1;
- Dois canais analógicos para TPS1 e TPS2 da válvula borboleta 2;
- Um canal analógico para o sensor de pressão diferencial;
- Um canal analógico para ajuste de marcha-lenta.

Pinos de I/O:

- Quatro saídas para controle de direção das válvulas borboletas;
- Duas saídas para LEDs sinalizadores da pressão do sensor diferencial;
- Dois canais PWM (válvula borboleta 1 e válvula borboleta 2).

Comunicação:

- Um módulo UART para comunicação com o *software* supervisor.

3.2.6.1 Escolha do Microcontrolador

A princípio seria utilizado o PIC16F887-I/P da *Microchip*. Para este projeto, o *firmware* desenvolvido necessita de duas malhas de controle, ou seja, uma para cada válvula borboleta. Dessa forma o microcontrolador ficou com a capacidade de memória de programa limitada. Outra questão era o tempo de amostragem, pois a sua frequência máxima de operação é de 20MHZ. Possivelmente para um período de amostragem de 10ms não atenderia, pois o processamento do algoritmo de um controlador PID demanda um considerável número de instruções. A opção foi o PIC18F46k22-I/P, que tem boa disponibilidade de memória, utilizando frequência de operação de 40MHZ com habilitação do seu PLL e usando cristal de 10MHZ. As principais características deste microcontrolador são:

- Frequência máxima de operação: 64MHz
- Operação em 16 bits
- Memória de programa (flash): 64 kB

- Memória Ram: 3896 B
- GPIO: 36 pinos
- Conversor AD: 30 canais com resolução de 10 bits
- Timers: 3 de 8 bits e 4 de 16 bits
- PWM: 4 canais de 10 bits
- Tensão de operação: 5 V

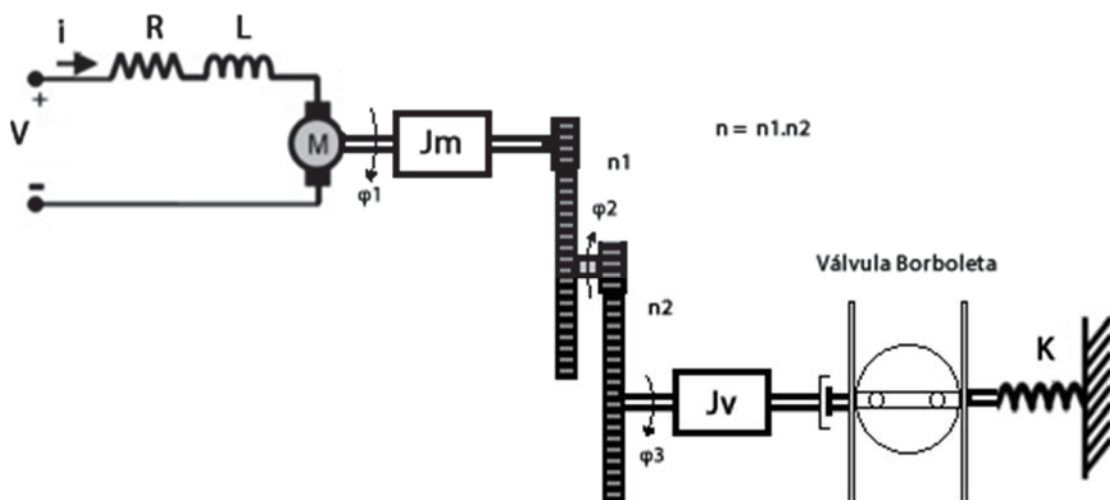
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do projeto, que irá detalhar o projeto do hardware, firmware e software do protótipo.

4.1 MODELO MATEMÁTICO DA VÁLVULA BORBOLETA

Analisando o funcionamento mecânico de uma válvula borboleta chegou-se ao modelo apresentado na Figura 21. O projeto contempla o uso de duas válvulas borboletas idênticas, o modelo analisado equivale para ambas.

Figura 21 – Modelo da válvula borboleta.



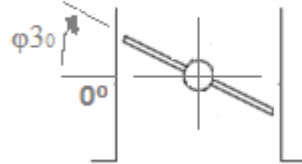
Fonte: O Autor.

Onde V , i , R , L referente ao motor CC representam a tensão de armadura, corrente, resistência e indutância respectivamente. $\varphi 1$ é a posição angular do eixo do motor, $\varphi 2$ é a posição angular da engrenagem intermediária, $\varphi 3$ é a posição angular da válvula borboleta, Jm é o momento de inércia do motor, Jv é o momento de inércia do eixo e do prato da válvula borboleta, n é o produto da relação do trem de engrenagens ($n=n1*n2$), K é a rigidez das molas ($K1$ e $K2$).

Para o projeto proposto as válvulas borboletas utilizam duas molas de retorno, sendo que uma mola realiza a abertura e a outra o fechamento da válvula borboleta. Quando o motor CC que controla a válvula borboleta estiver desligado o ângulo de abertura da válvula borboleta é

definido para um ângulo de abertura ϕ_{30} pela ação das molas, conforme pode ser visto na Figura 22.

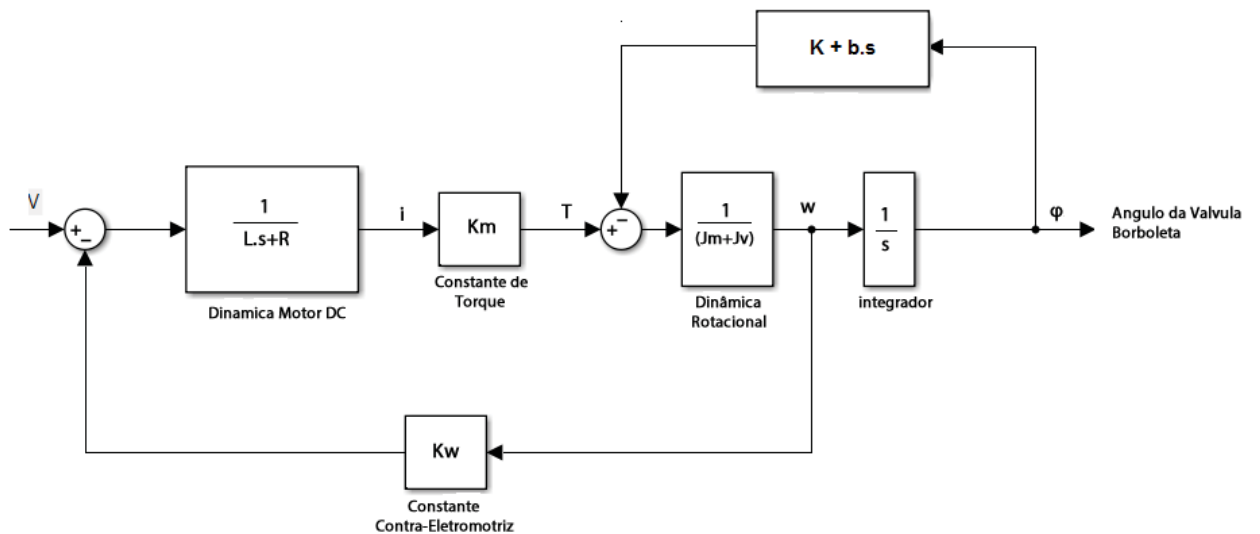
Figura 22 – Ângulo de abertura inicial.



Fonte: O Autor.

Dessa forma considerando a ação das duas molas e a partir dos dados já levantados foi possível a criação do diagrama de blocos da válvula borboleta apresentado na Figura 23.

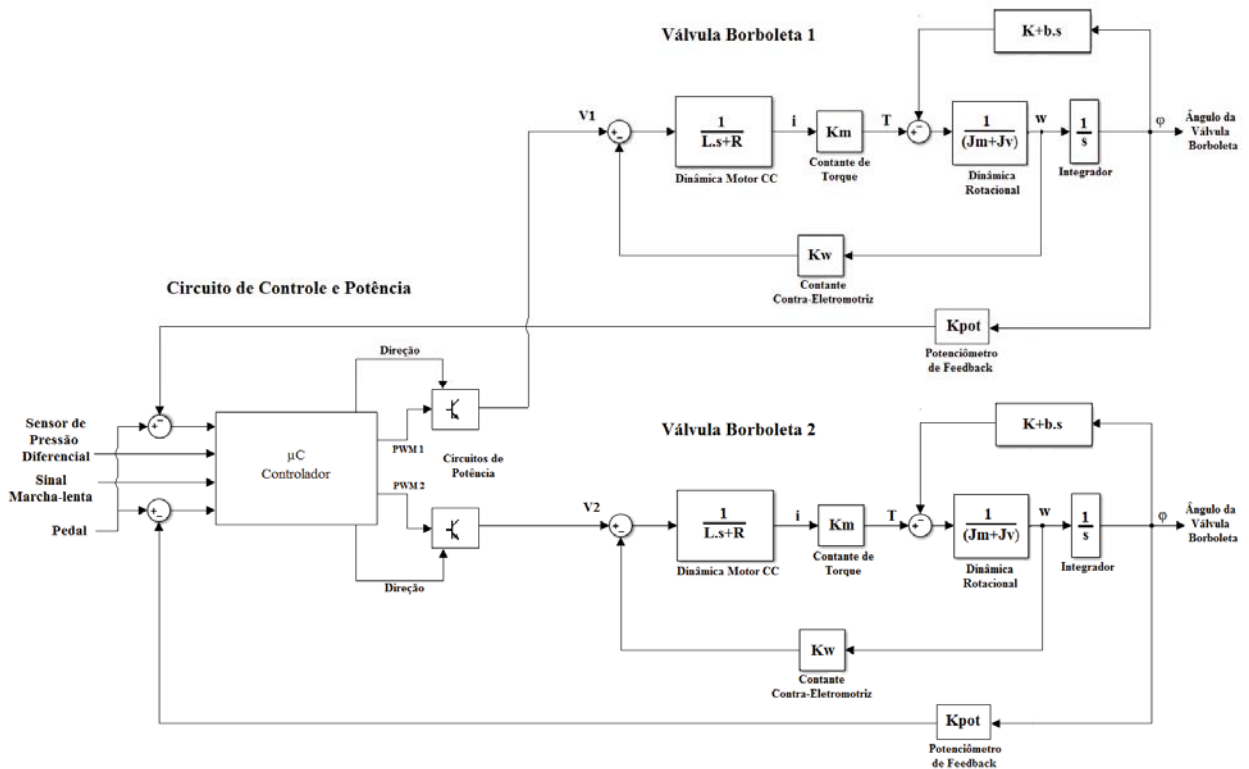
Figura 23 – Diagrama de blocos da válvula borboleta.



Fonte: O Autor.

A Figura 24 traz o diagrama completo de todo o sistema, que contempla o controlador com os diagramas de blocos das duas válvulas borboletas.

Figura 24 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle das Válvulas Borboletas.



Fonte: O Autor.

A partir do diagrama de blocos da Figura 23 é possível obter alguns parâmetros. Referente as características do motor, foi possível medir a sua resistência R com um multímetro, a indutância L com um indutímetro. As medidas foram $R=1,6\Omega$ e $L=0,87mH$. As molas não são ideais, e provavelmente não são lineares. O ângulo ϕ_0 conforme já foi comentado anteriormente é o ângulo em que a válvula borboleta está em repouso, ou seja, quando o motor CC que a controla está desligado. Este ângulo foi medido e é de aproximadamente 13° . Constantes de torque K_m , momento de inércia do motor J_m , e momento de inércia do eixo da válvula borboleta J_v , não são possíveis mensurar, pois a construção da mecânica da válvula borboleta não permite desmontagem, dificultando obter estes parâmetros.

Sem conhecer estes parâmetros fica impossível desenvolver o projeto de um controlador identificando individualmente seus parâmetros. Identificar tais parâmetros do modelo dinâmico das válvulas borboletas é bastante complexo. Com a aplicação do primeiro método de Zieger-Nichols é possível obter parâmetros iniciais para dar início ao projeto de um controlador. No próximo subcapítulo será abordado tal método.

4.2 PROJETO DO CONTROLADOR

4.2.1 Determinação dos parâmetros

Para a determinação inicial dos parâmetros do controlador das válvulas borboletas, é necessário um modelo matemático definido do sistema. Como muitas vezes esses parâmetros não são definidos e nem mensurados pelo fabricante, se fez necessário a aplicação de técnicas que não dependessem de modelo para a sintonia do controlador. Para esse trabalho foi adotado o primeiro método de Ziegler-Nichols, em que a análise da resposta à aplicação de um degrau ao motor CC da válvula borboleta é feita em malha aberta. O próximo passo é analisar a resposta do processo a esse degrau, medindo a taxa de variação e o tempo morto.

Com a aplicação de diferentes níveis de tensões diretamente ao motor da válvula borboleta, foram obtidos os seguintes ângulos do prato da válvula borboleta, conforme a Tabela abaixo:

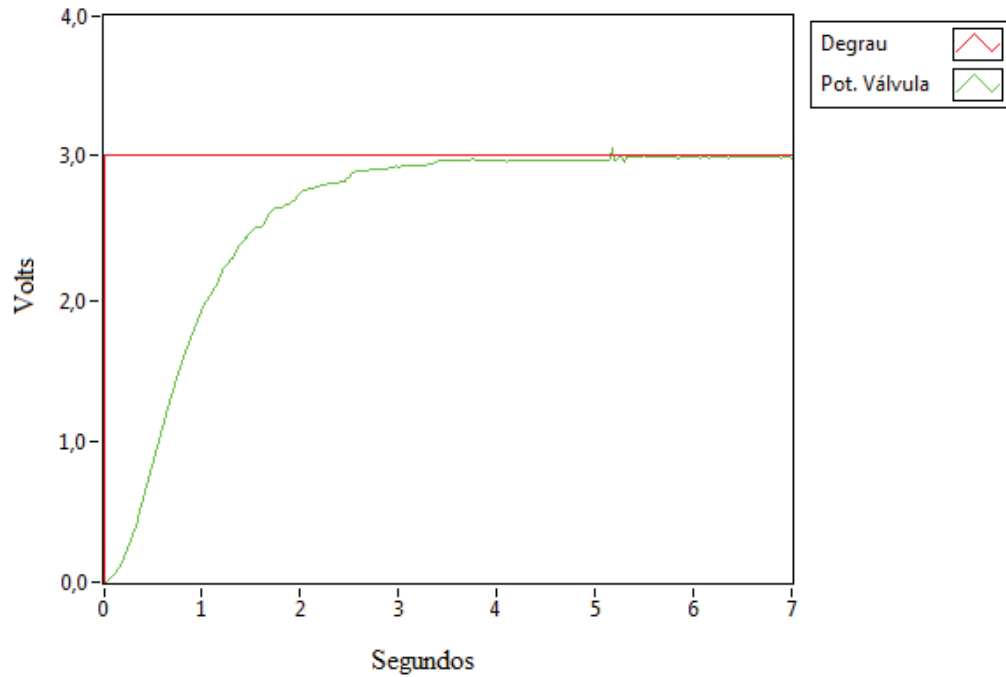
Tabela 3– Ângulo obtidos com diferentes tensões aplicadas a válvula borboleta.

Tensão(V)	Ângulo(φ)
0	13° (ângulo inicial φ_{30})
2.5	20°
3.0	60°
3.4	90° (totalmente aberta)

Fonte: O Autor.

Assim, escolhendo o ângulo de abertura intermediário de 60°, que equivale ao degrau de 3 Volts, foi capturado ao mesmo tempo o valor da tensão de um dos seus potenciômetros com o LabVIEW, onde foi gerado o gráfico da Figura 25.

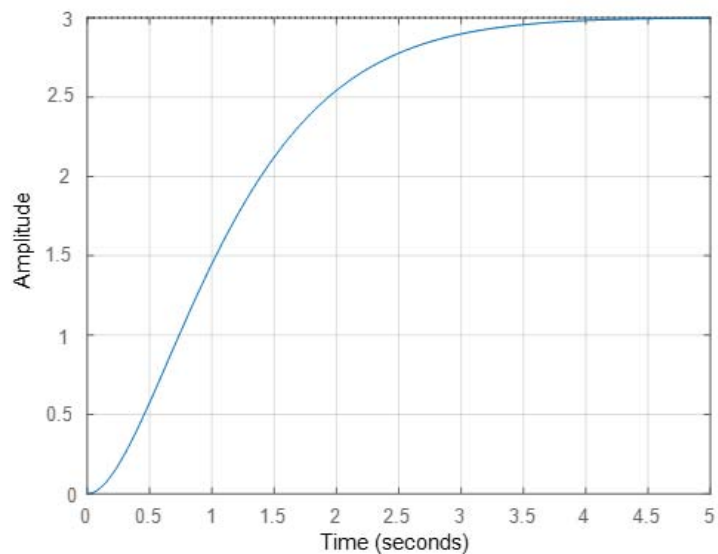
Figura 25 – Gráfico gerado no LabVIEW com aplicação de um degrau de 3v.



Fonte: O Autor.

Para melhor análise, o gráfico gerado no LabVIEW foi exportado para o MATLAB, conforme a Figura 26. No LabVIEW os dados do gráfico foram salvos em formato “.csv”, sendo possível importar pelo MATLAB.

Figura 26 – Gráfico exportado para o MATLAB.

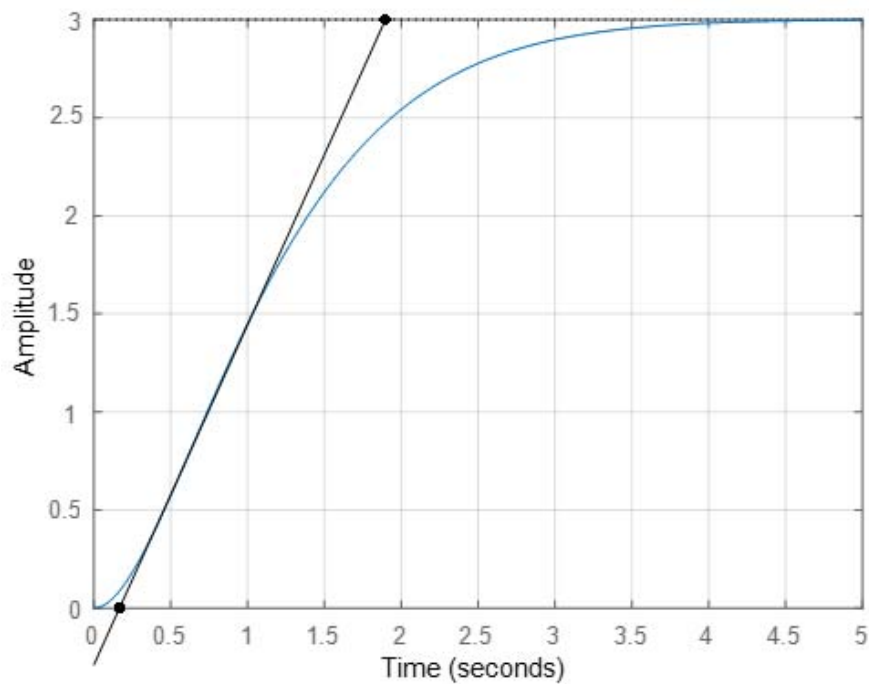


Fonte: O Autor.

Com o gráfico importado no MATLAB, é preciso encontrar duas constantes: tempo de retardo (L) e constante de tempo (T). Essas constantes são determinadas traçando-se uma reta, tangente ao ponto de inflexão da curva de resposta, encontrando-se os pontos de intersecção dessa reta com o eixo dos tempos e com uma reta dada por $c(t) = K$ conforme apresentado no subcapítulo 2.6.2 deste trabalho.

Traçando uma reta tangente no gráfico e utilizando o comando `ginput(2)`, é possível clicar sobre dois pontos no gráfico para encontrar os parâmetros L e T, conforme a Figura 27.

Figura 27 – Pontos encontrados utilizando primeiro método de Ziegler-Nichols.



Fonte: O Autor.

Pelo gráfico, temos que $L = 0.1718$, $T = 1.7282$. Uma vez determinada as constantes L e T, elas são usadas para determinação dos parâmetros do controlador, de acordo com a tabela proposta por Ziegler-Nichols em seu primeiro método. Referente ao controlador PID, tem-se:

$$Kp = 1.2 * \frac{1.7282}{0.1718} \quad (5)$$

$$Kp = 12.07 \quad (6)$$

$$Ti = 2 * 0.1718 \quad (7)$$

$$Ti = 0.3436 \quad (8)$$

$$Td = 0.5 * 0.1718 \quad (9)$$

$$Td = 0.0859 \quad (10)$$

O primeiro método de Ziegler-Nichols fornece uma estimativa inicial para os parâmetros do controlador. Caso a resposta do sistema controlado não seja satisfatória com os parâmetros fornecidos, devem ser feitos ajustes nestes parâmetros para as quais o sistema funcione satisfatoriamente. De posse do valor dos coeficientes do controlador, os mesmos foram aplicados ao programa do microcontrolador ao qual fará o controle das válvulas borboletas.

4.2.2 Controlador PID Digital

Uma metodologia bastante aplicada, devido a sua facilidade na implementação é definida por JACQUOT, 1994. Uma técnica para controlador PID discreto, dado por:

$$\frac{u(z)}{e(z)} = K_p \frac{\left[\left(1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right) + \left(\frac{T}{2T_i} - 2\frac{T_d}{T} - 1 \right) z^{-1} + \left(\frac{T_d}{T} \right) z^{-2} \right]}{1 - z^{-1}} \quad (11)$$

Onde, $u(z)$ é a saída do controlador, $e(z)$ é o erro no instante, T é o tempo de amostragem, K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integrativo, e T_d é o tempo derivativo.

Substituindo os coeficientes do polinômio superior por a_0 , a_1 e a_2 , tem-se:

$$\frac{u(z)}{e(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (12)$$

Sendo os termos a_0 , a_1 e a_2 os coeficientes do controlador com:

$$a_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right) \quad (13)$$

$$a_1 = -K_p \left(1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T} \right) \quad (14)$$

$$a_2 = K_p \left(\frac{T_d}{T} \right) \quad (15)$$

Com isto, a lei de controle que foi implementada no microcontrolador é mostrada a seguir:

$$u(z)(1 - z^{-1}) = a_0e(z) + a_1z^{-1}e(z) + a_2z^{-2}e(z) \quad (16)$$

$$u(z) - u(z)z^{-1} = a_0e(z) + a_1z^{-1}e(z) + a_2z^{-2}e(z) \quad (17)$$

$$u(z) = u(z)z^{-1} + a_0e(z) + a_1z^{-1}e(z) + a_2z^{-2}e(z) \quad (18)$$

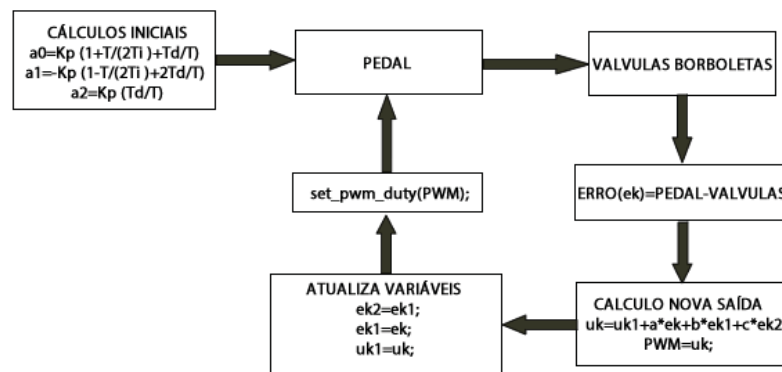
Aplicando a transformada inversa Z, obtém-se:

$$u(k) = u(k - 1) + a_0e(k) + a_1e(k - 1) + a_2e(k - 2) \quad (19)$$

Assim, $u(k)$ é a saída do controlador, $u(k-1)$ é a saída no instante anterior, $e(k)$ é o erro no instante, $e(k-1)$ é o erro um instante de amostragem atrás, $e(k-2)$ é o erro dois instantes de amostragem atrás.

Utilizando as equações 13, 14, 15 e 19, é possível elaborar o algoritmo de controle em linguagem C, conforme fluxograma simplificado da Figura 28.

Figura 28 – Fluxograma do algoritmo de controle PID.



Fonte: O Autor.

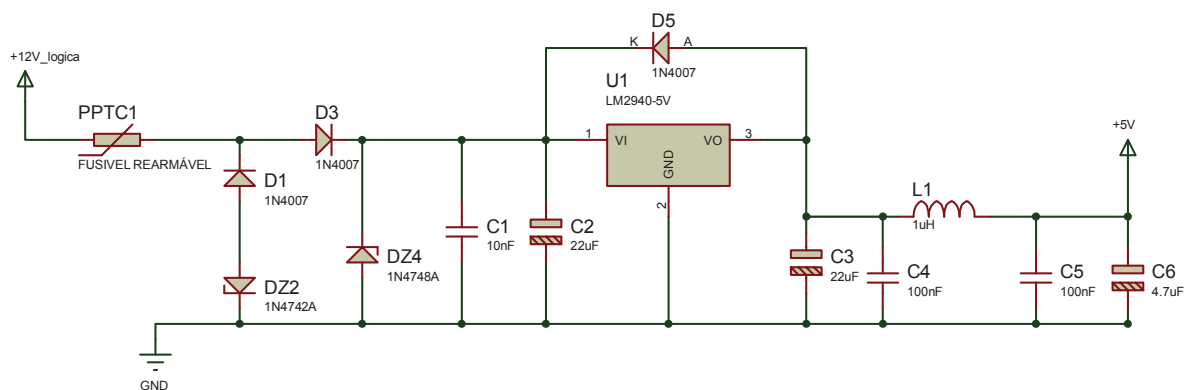
Com $K_p=12.07$, $T_i=0.3436$, $T_d=0.0859$ calculados, e definindo um período de amostragem $T=10\text{ms}$, os valores então foram aplicados ao microcontrolador. O período de amostragem T , foi escolhido menor que $\frac{L}{10} = \frac{0,1718}{10} = 0,018$. Quanto menor este período de amostragem, mais preciso se torna o controlador. Este trabalho adotou um período de amostragem de 10ms , sendo este limitado pelo processamento do hardware utilizado.

4.3 CIRCUITOS DESENVOLVIDOS

4.3.1 Fonte de alimentação

Como o protótipo é de uso automotivo, a tensão de entrada é 12 V. Para o funcionamento do circuito, são necessários apenas dois níveis de tensão, 12 V para os circuitos de acionamentos (ponte-H) das válvulas borboletas e 5 V para a parte lógica do controlador. Para obtenção do nível de 5 V, o projeto do circuito da fonte pode ser observado na figura a seguir.

Figura 29 – Fonte de alimentação.



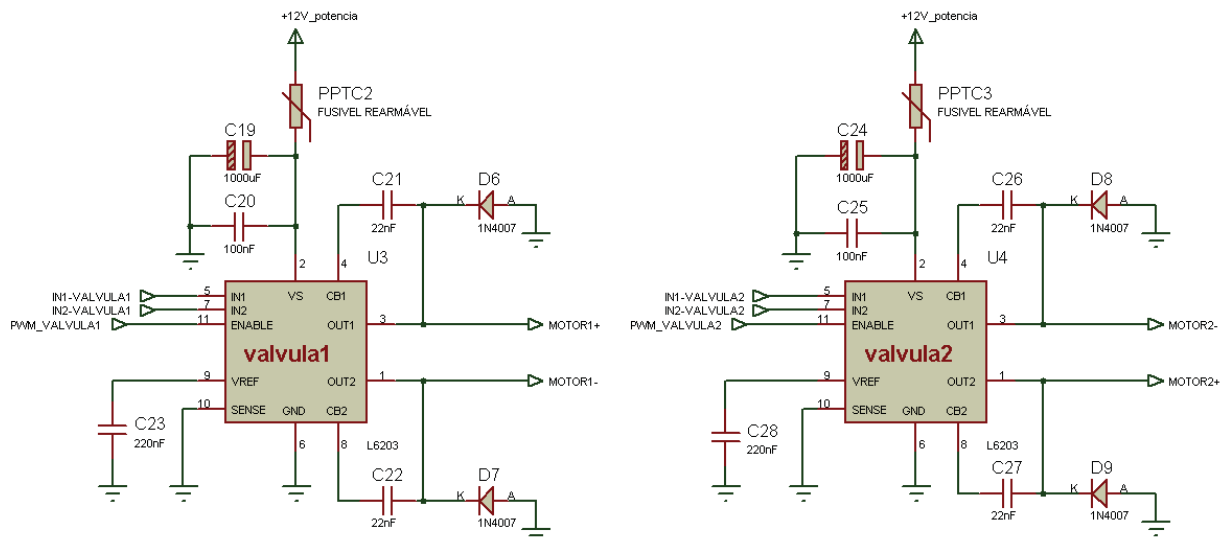
Fonte: O Autor.

O PPTC1 (polymeric positive temperature coefficient) é um fusível rearmável de 1 A, responsável pela proteção do circuito contra sobre corrente. O diodo D3 protege contra inversão de polaridade nos terminais da bateria. Os diodos D1, DZ2, DZ4 são para proteção contra picos de sobre tensão. D5 é para proteção extra do regulador. O circuito integrado LM2940-5V é um regulador SMD de 5 V que opera com tensão de entrada mesmo abaixo de 7 V. A escolha por este regulador, se dá pelo fato de que no momento de partida de um MCI, a tensão da bateria pode chegar a menos de 9 V. Assim, um regulador que tolera baixa tensão de entrada não interrompe sua tensão de saída para a parte lógica, não comprometendo assim o funcionamento do circuito. Seguindo o *datasheet* do LM2940-5V, os capacitores C2 e C3 precisam ser de baixo ESR, portanto foram utilizados capacitores de tântalo. Os capacitores C1, C4, C5 e C6 e o indutor L1 são para filtro contra ruídos.

4.3.2 Circuitos de acionamento das válvulas borboletas

Os circuitos de potência que acionam cada um dos motores da válvula borboletas são compostos pelos circuitos integrados L6203, conforme figura a seguir.

Figura 30 – Circuitos de potência pontes-H L6203.



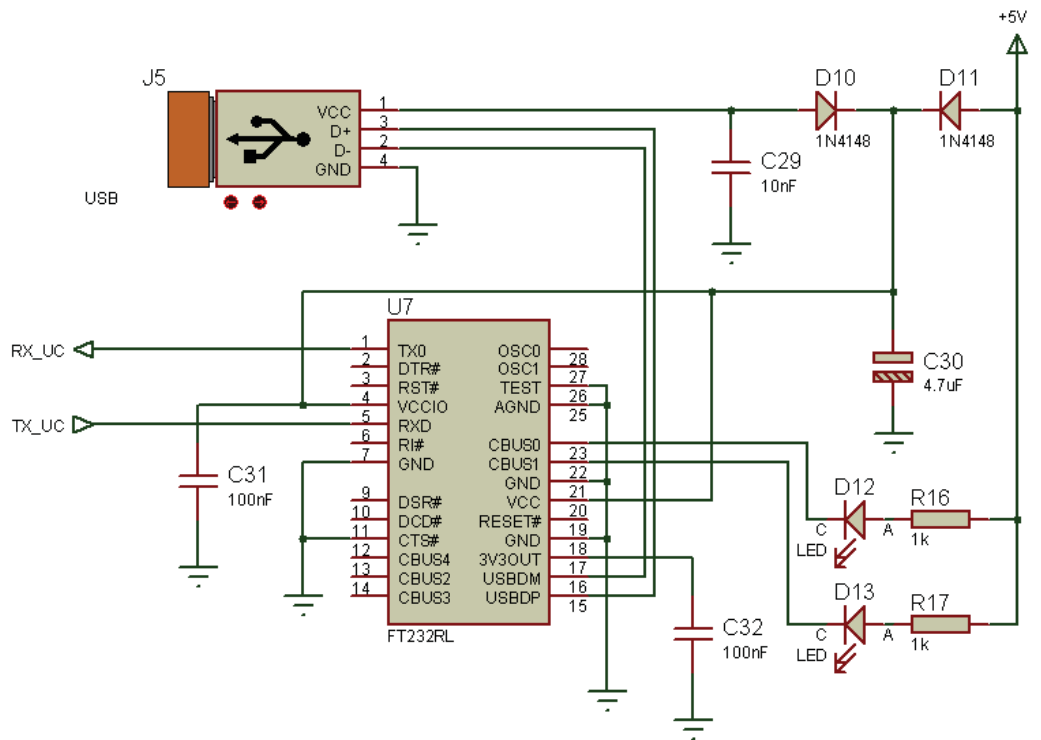
Fonte: O Autor.

Os capacitores e diodos que compõem os circuitos são os mesmos recomendados pelo *datasheet* do fabricante. Os pinos 5 e 7 são utilizados para habilitar ou desabilitar as saídas das pontes-H (pinos 1 e 3). São utilizados também para a direção do motor, ou seja, abrir ou fechar as válvulas borboletas. O pino 11 é a entrada de PWM gerada pelo microcontrolador, que para este projeto foi fixada em 13KHz. Os fusíveis rearmáveis PPTC2 e PPTC3 foram acrescentados apenas para proteção contra curto circuito no caso de falha das pontes-H, como um ou dois transistores em curto, ou se as correntes dos motores ultrapassam do valor normal de operação. Foram feitas medições dos motores CC das válvulas borboletas, e a corrente média varia de 300mA (quando a válvula borboleta está perto da sua posição de repouso) e cerca de 750mA (quando a válvula borboleta está com abertura máxima). No entanto, por outros motivos como, curto circuito no motor, curto circuito na fiação, bloqueio ou resistência ao movimento do prato da válvula borboleta, fazendo a corrente se elevar acima de 1 A, os fusíveis rearmáveis atuarão e farão o corte de energia. Portanto, não há a necessidade de outras estratégias implementadas no *firmware*.

4.3.3 Comunicação Serial

Para a comunicação serial foi utilizado o circuito integrado FT232RL que é um conversor USB-TTL, fazendo a ligação entre a porta USB de um computador e os pinos RX e TX do microcontrolador. De modo que não é necessário utilizar outros circuitos ou conversores, simplificando o circuito. Na figura a seguir é mostrado o seu esquemático.

Figura 31 – Circuito de comunicação serial.



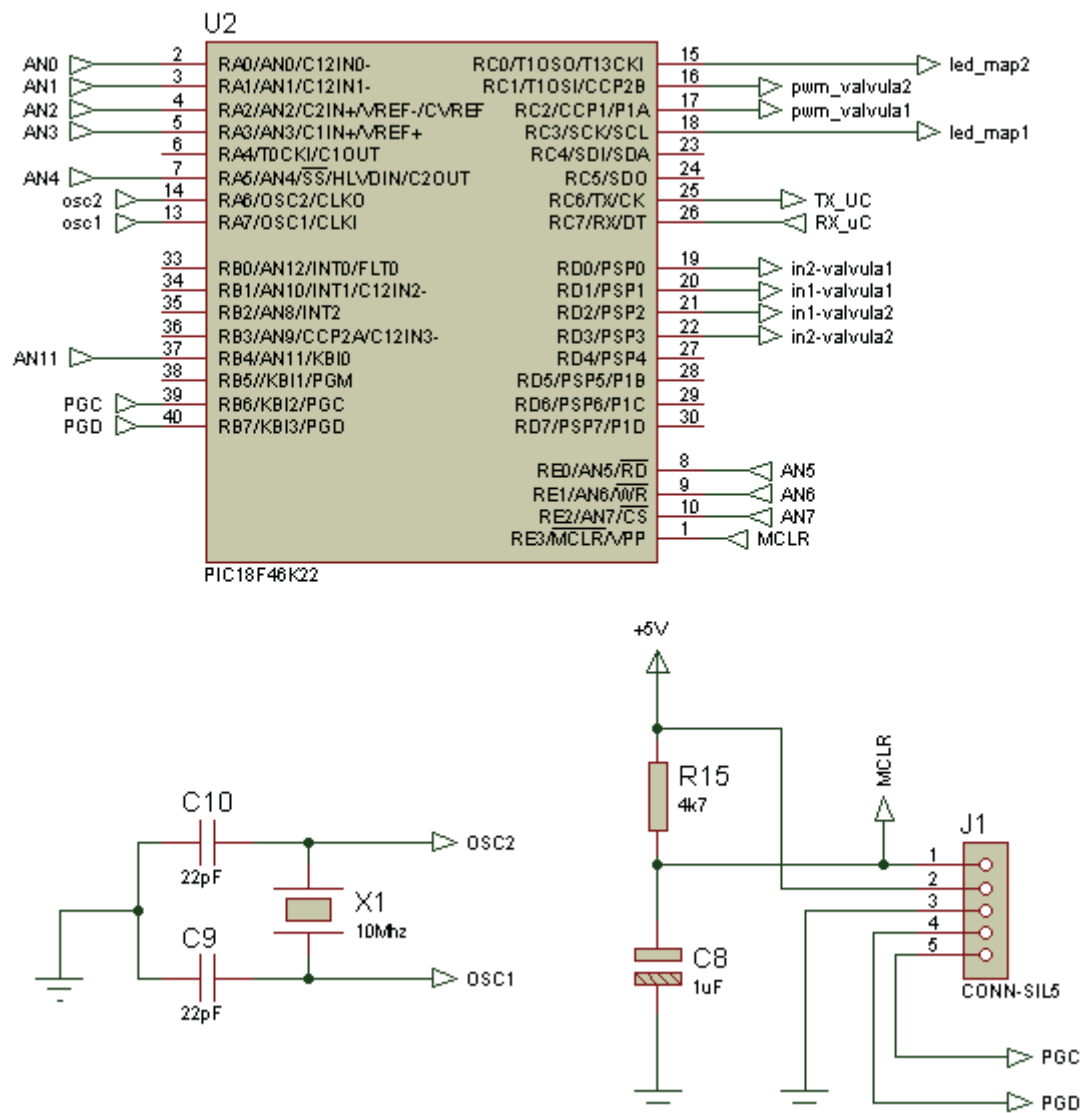
Fonte: O Autor.

Os componentes têm valores típicos conforme orientação do *datasheet* do próprio componente.

4.3.4 Microcontrolador

Para o funcionamento do microcontrolador que pode ser visto na Figura 32, é necessária a ligação dos pinos de alimentação, do cristal oscilador e capacitores, e dos devidos pinos para gravação do *firmware* pelo conector icd2 do gravador PICKit3.

Figura 32 – Esquema elétrico dos pinos do microcontrolador.



Fonte: O Autor.

As conexões e definições dos pinos de entrada e saída do microcontrolador podem ser verificados na Tabela 4.

Tabela 4–Conexões dos pinos do microcontrolador.

Pino	Configuração	Conexão
2	Entrada Analógica AN0	Sensor 1 (pedal acelerador)
3	Entrada Analógica AN1	Sensor 2 (pedal acelerador)
4	Entrada Analógica AN2	Sensor 1 (TPS 1 - válvula borboleta 1)
5	Entrada Analógica AN3	Sensor 2 (TPS 2 - válvula borboleta 1)
7	Entrada Analógica AN4	Sensor 1 (TPS 1 - válvula borboleta 2)
8	Entrada Analógica AN5	Sensor 2 (TPS 2 - válvula borboleta 2)
10	Entrada Analógica AN7	Sensor de pressão diferencial
15	Saída RC0	Led_map 2
16	Saída PWM 2	Pino 11 ponte-H 2 (válvula borboleta 2)
17	Saída PWM 1	Pino 11 ponte-H 1 (válvula borboleta 1)
18	Saída RC3	Led_map 1
19	Saída RD0	Pino 7 ponte-H 1
20	Saída RD1	Pino 5 ponte-H 1
21	Saída RD2	Pino 5 ponte-H 2
22	Saída RD3	Pino 7 ponte-H 2
25	Tx_μC	Rx_FT232RL
26	Rx_μC	Tx_FT232RL
37	Entrada Analógica AN11	Sinal marcha-lenta

Fonte: O Autor.

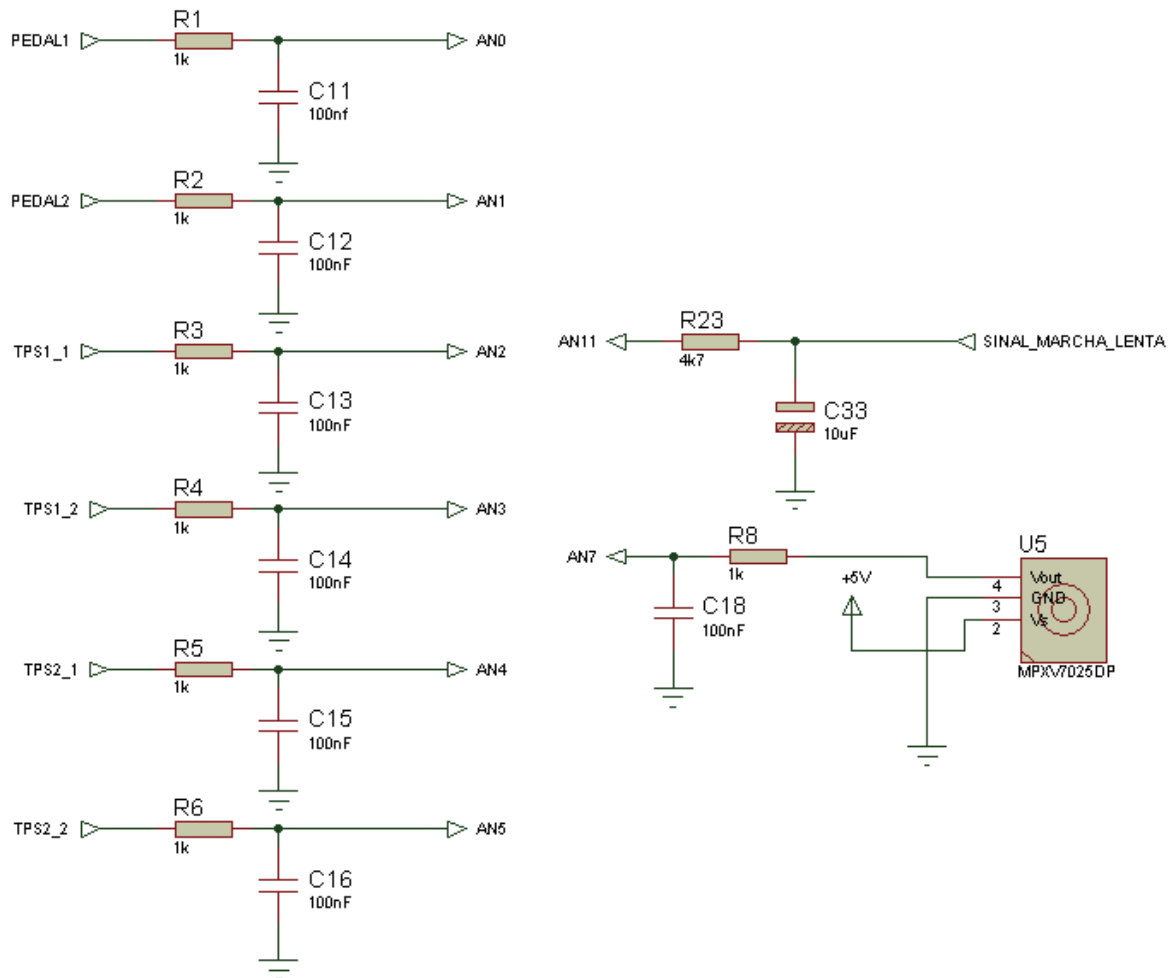
Em cada entrada dos conversores analógicos digitais utilizados, foi inserido um resistor em série com a devida entrada analógica e o sensor, juntamente com um capacitor ao GND conforme a Figura 33. Desse modo foi feito um filtro passa-baixa, para evitar ruídos de alta frequência, dado por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_x C} \quad (20)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 1000 \times 0.1\mu F} \quad (21)$$

$$f_c = 1.592\text{KHz} \quad (22)$$

Figura 33 – Entradas dos conversores analógicos digitais.

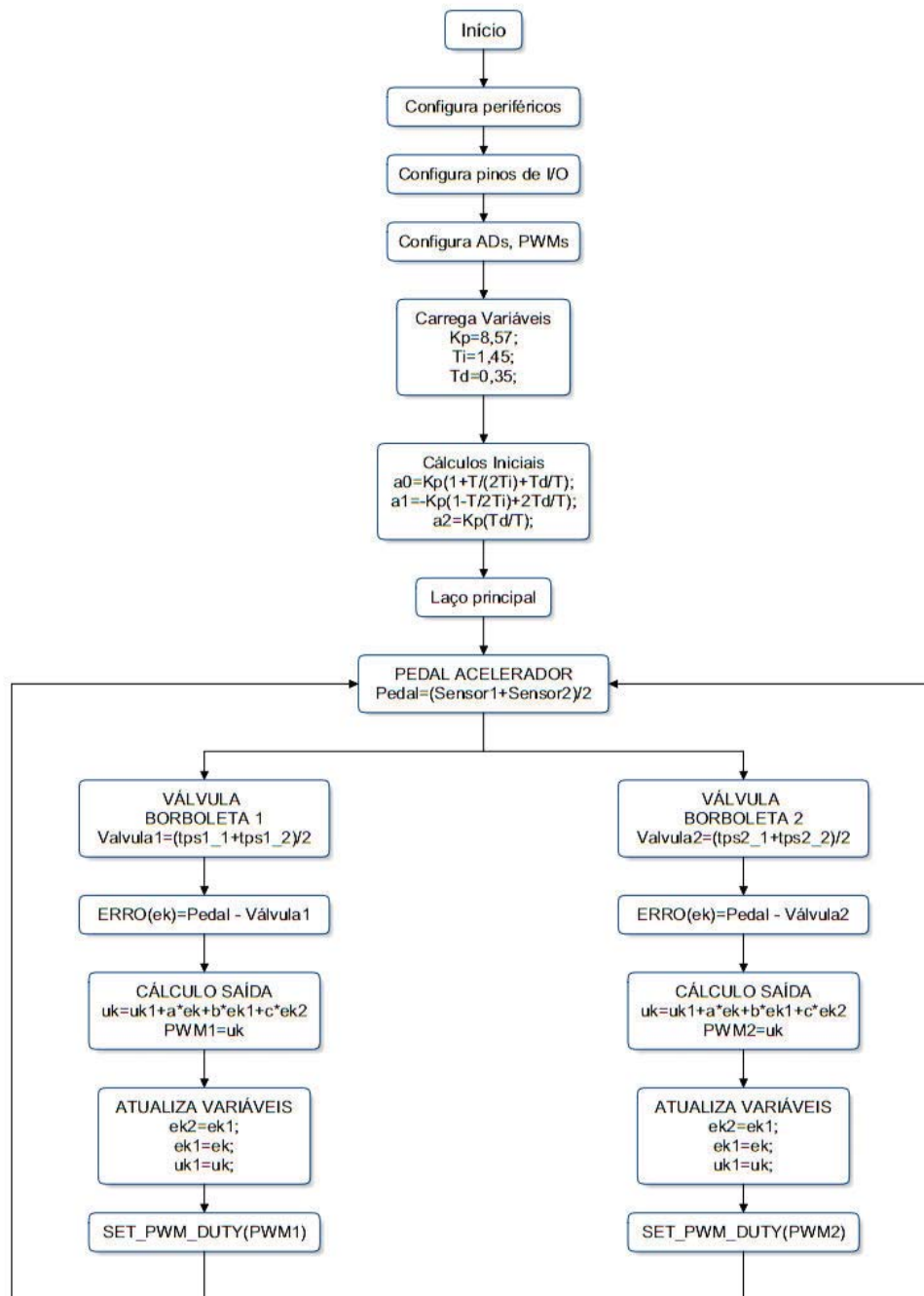


Fonte: O Autor.

4.4 FIRMWARE

O *firmware* instalado no microcontrolador foi desenvolvido utilizando programação em linguagem C. Na Figura 34 pode-se observar um fluxograma simplificado. Primeiramente configura e inicializa os periféricos, e posteriormente são configurados os pinos de entrada, saída, ADs e PWMs. Feitas as configurações iniciais, o programa então executa a leitura dos sinais dos sensores e faz o devido controle das duas válvulas borboletas, cada uma com seu controle em malha fechada, baseando-se no erro (e_k) entre a diferença do pedal do acelerador e a posição angular de ambas válvulas borboletas.

Figura 34 – Fluxograma simplificado do controlador.



Fonte: O Autor.

O fluxo elaborado na Figura 34 representa simplesmente um fechamento de malha, onde o erro (diferença entre o pedal e a abertura angular de cada uma das válvulas borboletas) é calculado. O motor CC das válvulas borboletas são alimentados pela tensão média fornecida por PWM enviadas pelo microcontrolador. Baseado no erro calculado (pedal-Válvulas) é definido o nível de PWM que o microcontrolador deve enviar para o controle das pontes-H dos motores CC.

4.4.1 Estratégia no Controle das Válvulas Borboletas

Cada válvula borboleta tem dois potenciômetros, assim como o pedal do acelerador. Dessa forma, o sistema é redundante. A cada interação do controle, o *firmware* analisa a integridade dos sinais dos potenciômetros, e caso todos estejam condizentes, calcula a abertura (saída do controle PID) das válvulas borboletas conforme a atuação no pedal, e aplica a tensão PWM nos motores CC das válvulas borboletas. Para o controlador foi desenvolvido uma estratégia que funciona da seguinte forma:

- Se a tensão de um dos sinais dos sensores do pedal estiver fora da faixa de 0,2 V e 4,8 V, ou seja, qualquer tensão acima ou abaixo destes valores indicam quebra de fiação, falha no potenciômetro, curto-circuito com 5 V ou GND. Então, o microcontrolador utiliza o outro sensor (íntegro) porém limita a abertura das duas válvulas borboletas que para este projeto foi limitado em 50%.
- Se houver perda dos dois sinais do pedal, o microcontrolador desativa os motores das duas válvulas borboletas, fazendo-as ir para a condição de repouso (Limp Home). Fazendo isso, é garantido que o MCI permaneça ligado, mas em marcha-lenta alta.

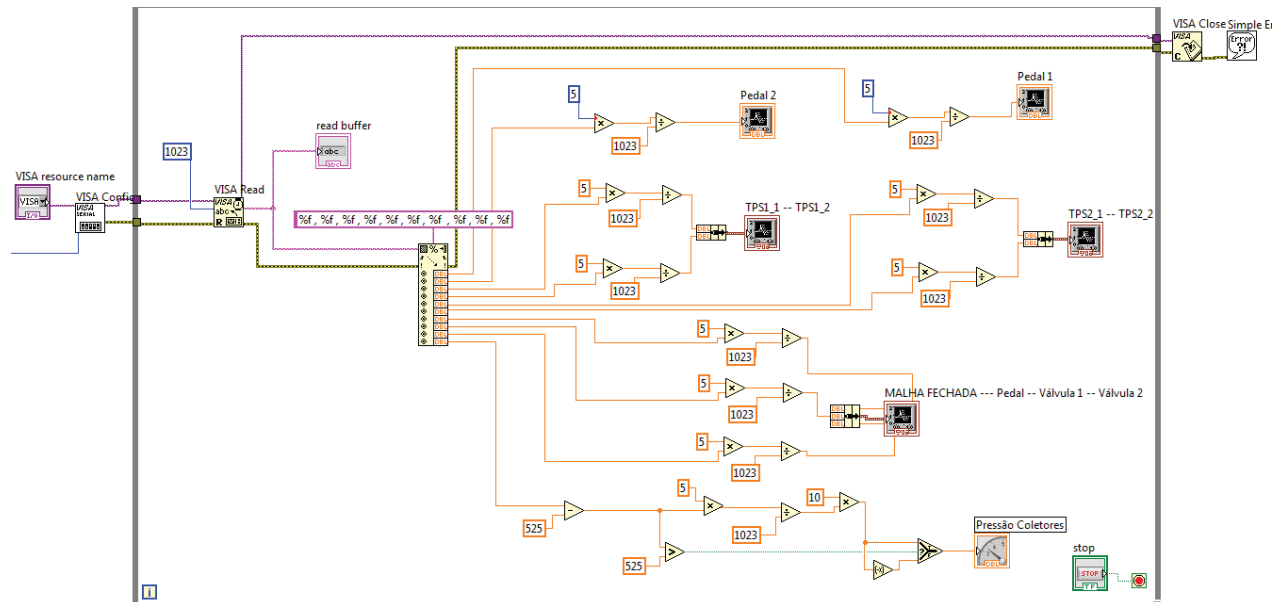
Para a análise dos sinais das válvulas borboletas a estratégia é semelhante. Se houver perda de um sensor em qualquer uma das válvulas borboletas, a situação é análoga à perda de um sensor de pedal, ou seja, a abertura das duas válvulas borboletas será limitada. Se houver perda dos dois sinais de qualquer uma das válvulas borboletas, as pontes-H são desabilitadas, fazendo as válvulas borboletas voltarem para a condição de repouso.

4.5 SOFTWARE SUPERVISÓRIO

Para análise dos sensores e comprovação do fechamento da malha de controle entre o pedal e as válvulas borboletas, foi desenvolvido no ambiente do LabVIEW o diagrama de blocos conforme a Figura 35. A Figura 36 mostra o painel frontal de interface do usuário, exibindo os instrumentos virtuais criados. Para a comunicação entre o controlador das válvulas borboletas e o LabVIEW, foi utilizada a velocidade de 115200 baud.

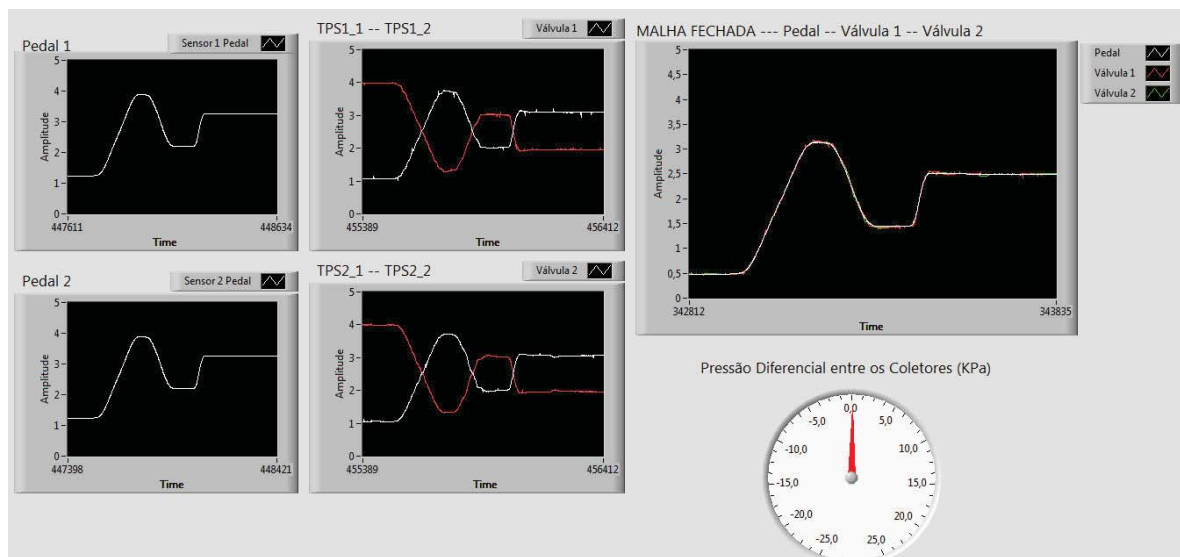
No primeiro bloco temos o recebimento dos dados via serial. O microcontrolador envia uma sequência de caracteres com os dados em tempo real da leitura dos sensores. O LabVIEW recebe e trata cada dado, separando-os e direcionando para instrumento virtual.

Figura 35 –Diagrama de blocos desenvolvido no LabVIEW.



Fonte: O Autor.

Figura 36 –Instrumentos virtuais criados no LabVIEW.



Fonte: O Autor.

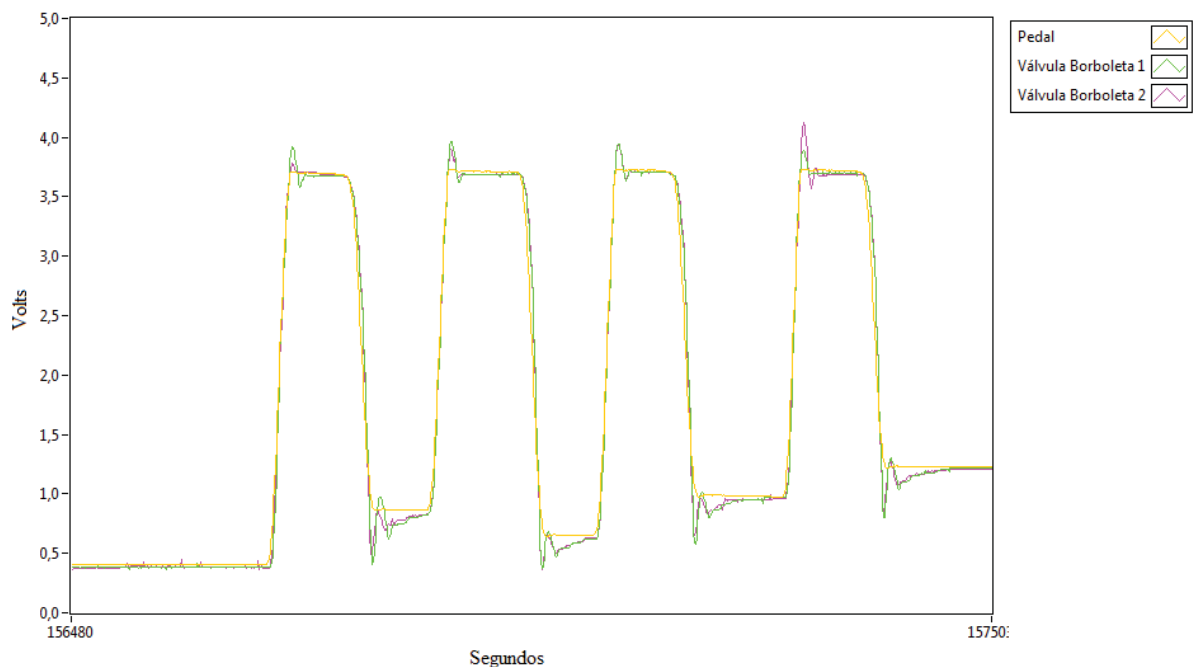
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROGRAMA LABVIEW (SUPERVISÓRIO)

Com os valores $K_p=12,07$, $T_i=0,3436$ e $T_d=0,0859$ fornecidos pelo primeiro método de Ziegler-Nichos e aplicados ao microcontrolador, foi realizado o seguinte teste:

O pedal do acelerador foi acionado bruscamente, gerando o resultado que pode ser conferido na Figura 37.

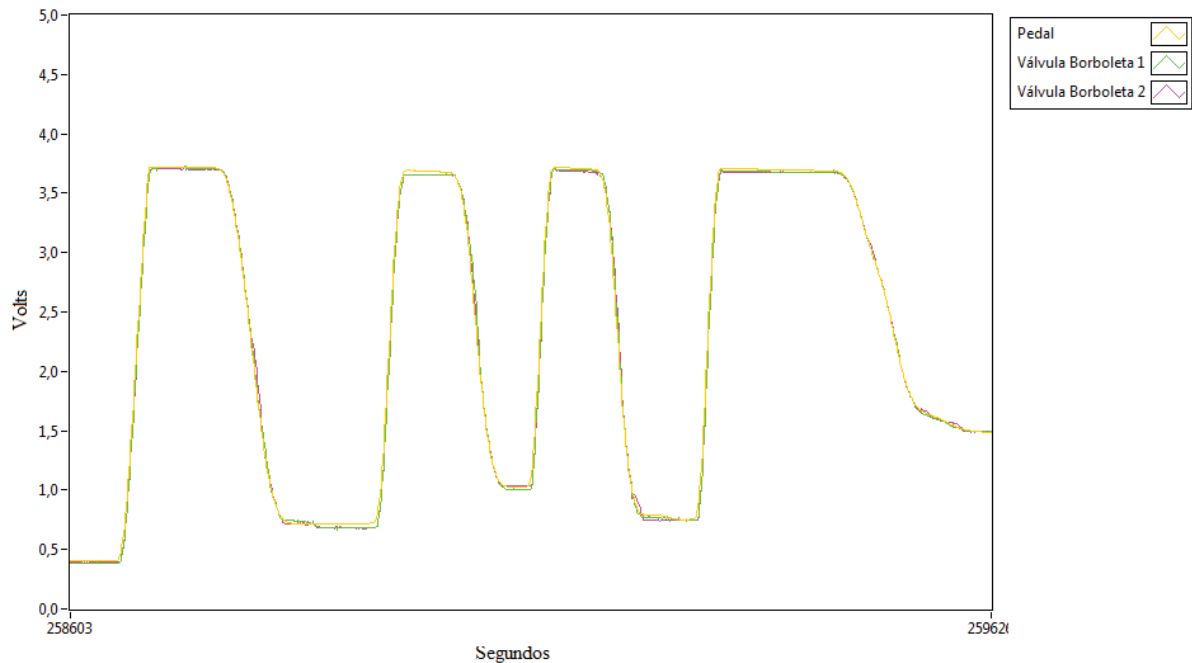
Figura 37 –Gráfico resultante em malha fechada do pedal, válvula borboleta 1 e válvula borboleta 2.



Fonte: O Autor

Nota-se que o sistema apresenta sobressinal. Tomando como base os coeficientes encontrados para o controlador, e fazendo ajustes por tentativa e erro, chegou-se aos valores $K_p=8,57$, $T_i=1,45$ e $T_d=0,35$, apresentando um comportamento satisfatório no controle das válvulas borboletas, conforme mostra a Figura 38.

Figura 38 – Gráfico resultante em malha fechada, com ajuste dos coeficientes.



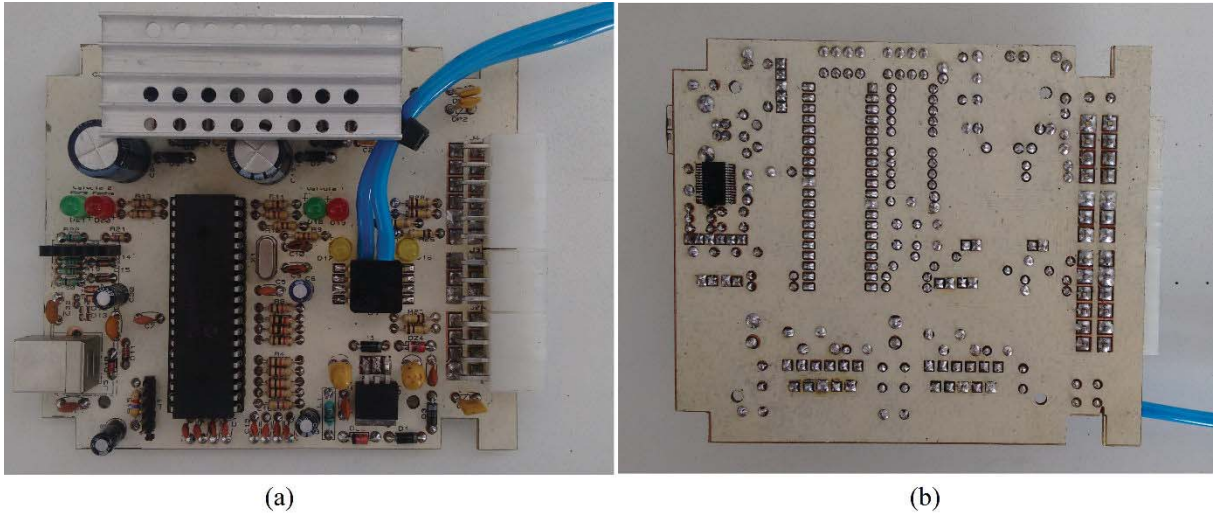
Fonte: O Autor

Como a aceleração de um MCI é variável e o acionamento do pedal do acelerador é semelhante a uma rampa, talvez um pequeno erro estacionário não causará grande influência no seu funcionamento.

5.2 HARDWARE ELETRÔNICO

A placa de circuito impresso do controlador foi projetada com o *software* Proteus. A placa possui duas faces, e para reduzir a influência de ruídos no circuito, uma malha (com tensão zero) foi implantada. Os arquivos gerados pelo *software* para a placa projetada, podem ser visualizados no APENDICE B. A Figura 39 mostra a placa de circuito já com os componentes soldados, onde (a) mostra o lado de cima (*top cooper*) e (b) mostra a parte de baixo da placa (*bottom cooper*).

Figura 39 – Placa de circuito impresso desenvolvida.



Fonte: O Autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O controlador PID desenvolvido cumpriu com os objetivos propostos, realizando o controle das válvulas borboletas satisfatoriamente.

Com o auxílio do *software* LabVIEW foi possível visualizar os sinais dos sensores sendo de grande importância para a afinação do controlador. Foi definido parâmetros experimentais através da aplicação do primeiro método de Zieger-Nichols, e utilizados para o desenvolvimento do *firmware* do microcontrolador.

A partir da análise do gráfico gerado em malha fechada, foi possível realizar a sintonia do controlador por meio de pequenos ajustes dos seus coeficientes pelo método da tentativa e erro.

O próximo passo, é a instalação do controlador e das válvulas borboletas em um motor Boxer para teste efetivo. Para trabalhos futuros, está previsto o desenvolvimento de um aplicativo de celular, fazendo a comunicação com o controlador via bluetooth.

REFERÊNCIAS

ADLER, U. *Automotive Electric/Electronic Systems*, 1st Edition. Robert Bosch GmbH - Automotive Equipment Product Group. Stuttgart, 1988.

BOSCH. Manual de Tecnologia Automotiva. 25. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

BOWLING & GRIPPO, 2017. Instalation Manual, disponível em:
<<http://www.megasquirt.info/>> Acesso em: 05 maio 2017.

BRAGA, G. T. **Uma Contribuição ao Controle de Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha na Condição de Marcha Lenta**. 2007, 72 f. Dissertação (Mestrado) — UFMG, Belo Horizonte, MG, 2007.

CÂMARA, J. C. C. Monitoramento Eletrônico da mistura Ar/Combustível em Motores a Combustão Interna Ciclo Otto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. 171.

CONTESINI, Leonardo. 2016. Qual a diferença entre motor Boxer e Flat, disponível em:
<<https://www.flatout.com.br/qual-diferenca-entre-motor-flat-e-motor-boxer/>> Acesso em: 19 de setembro de 2017.

CORSI, Fabricio. 2008, O Motor do Carocha, disponível em:
<<http://www.facavocemesmo.net/o-motor-do-carocha-fusca/>> Acesso em: 18 de setembro de 2017.

COSTA, Paulo G. 2002, Difusor Jatos Fixos, disponível em:
<<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=25>> Acesso em: 16 de abril de 2017.

DELPHI. ETC Air Control Valve (ETC-ACV). Rochester – New York:[s.n.], 2003.

DIAS, B. M. A. Unidade Microcontroladora para Gerenciamento Eletrônico de um Motor de Combustão Interna Ciclo Otto. 2015. 283p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

GUEDES, M. A. C. Estudo de Compensadores para a Válvula Borboleta Eletrônica Automotiva. 2014. 155p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

JACQUOT, R. G. Modern Digital Control System 2nd, ed. 1994.

MANAVELLA, Humberto. **Acelerador Eletrônico: Caraterísticas e funcionamento específico do componente**. Disponível em:
<<http://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/acelerador-eletronico-carateristicas-e-funcionamento-e-especifico-do-componente>>. Acesso em: 03 maio 2017.

MILHOR, C. E. Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores a Combustão Interna Ciclo Otto. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002. 101.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno, Pearson Prentice Hall – 5ª Edição, São Paulo, 2010.

PASSARINI, L. C. Projeto e Análise de Válvulas Eletromagnéticas Injetoras de Combustível: Uma nova proposta. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993.

PASSOS, Rodrigo. 2015, 27% de etanol na gasolina: Quais os efeitos para nossos motores, disponível em:

<<https://www.flatout.com.br/27-de-etanol-na-gasolina-quais-os-efeitos-para-os-nossos-motores/>> Acesso em: 29 de abril de 2017.

PUJATTI, F. J. P. Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha. 2007. 221p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SHARP, Bob. **Acelerador Elétrico**. Disponível em:

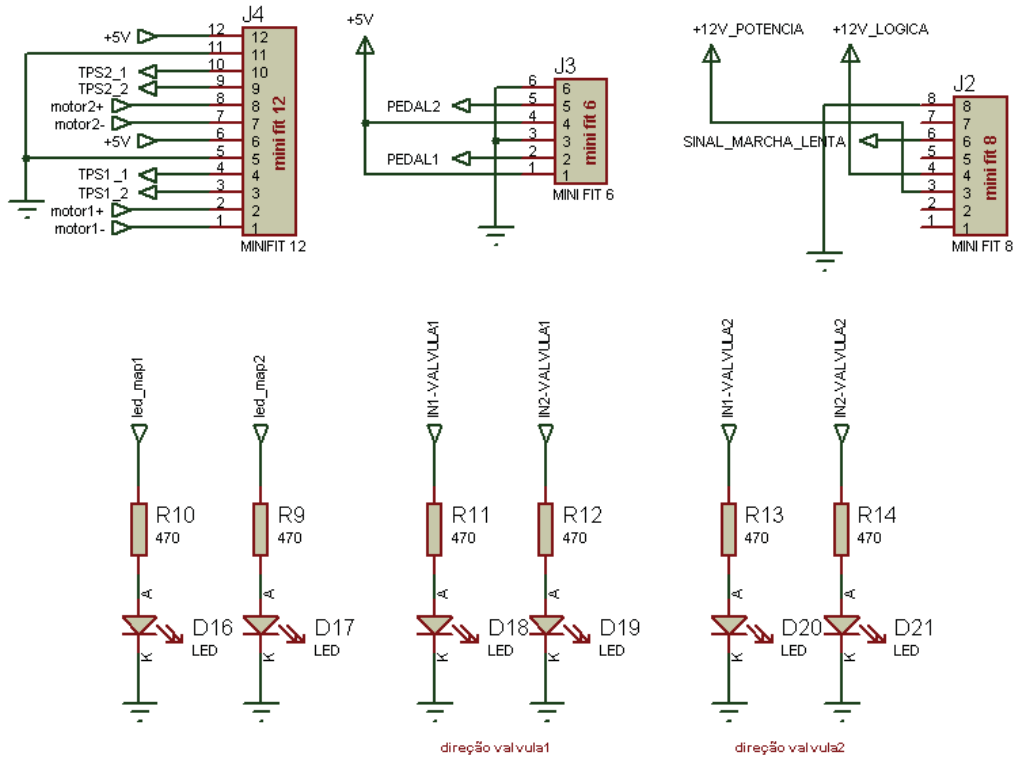
<<http://blog.tribunadonorte.com.br/autosemotores/2016/03/23/acelerador-eletrico-segundo-melhor-amigo-do-homem-por-bob-sharp/>>. Acesso em: 01 maio 2017.

VEIGA, M. R. Desenvolvimento de um Gerenciador Eletrônico para Motores Tricombustível. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. 137.

VOLKSWAGEN (Brasil). **Sistema de Gerenciamento de Motores Aspirados**. São Bernardo do Campo: Academia Volkswagen, 2009. 96p. Apostila técnica para treinamento do produto.

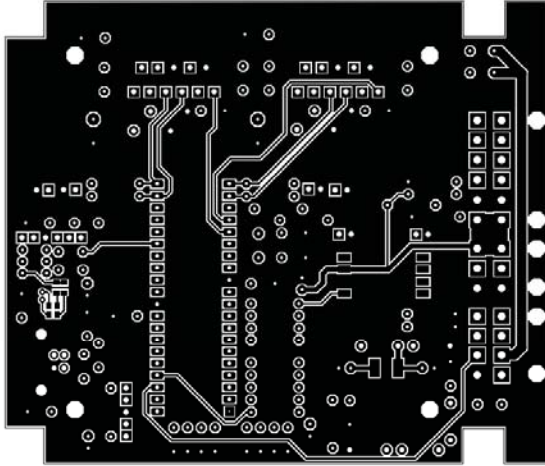
WILDNER, F. D. Estudo Experimental da Variação de Velocidade de Combustão para Diferentes Combustíveis, Relações de Misturas e Relações de Compressão em um Motor STM CFR. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 122p.

APÊNDICE A - LEDS E CONECTORES NÃO APRESENTADOS NO DESENVOLVIMENTO

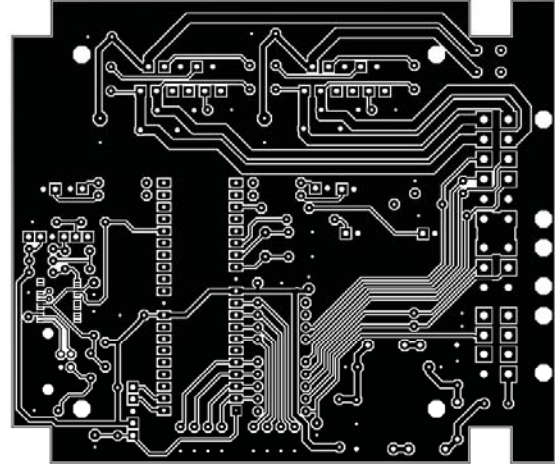


APÊNDICE B – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA

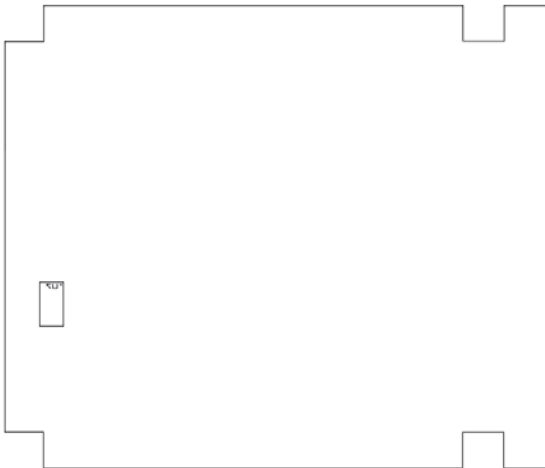
Top Cooper



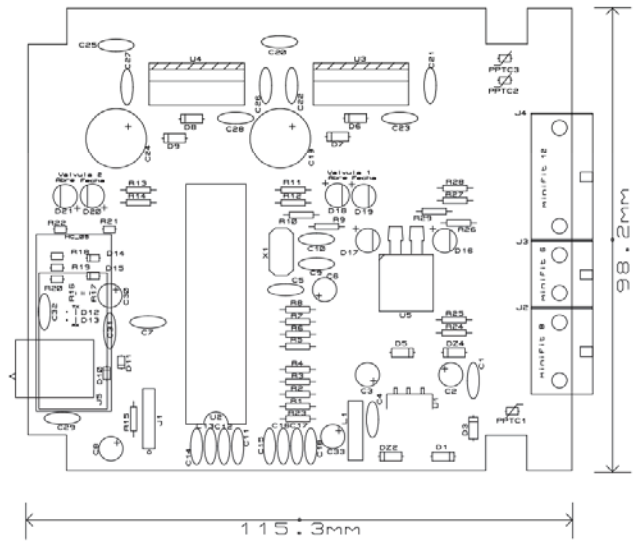
Botton Cooper



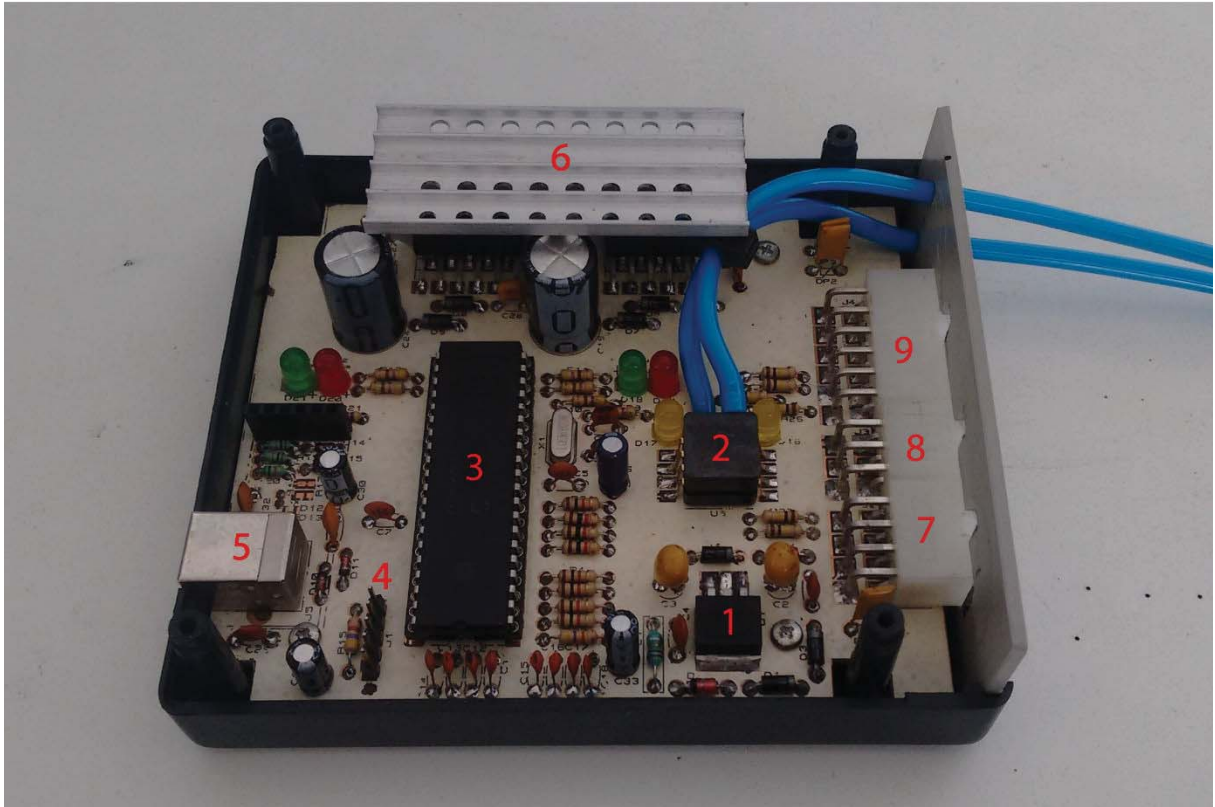
Top Silk



Botton Silk

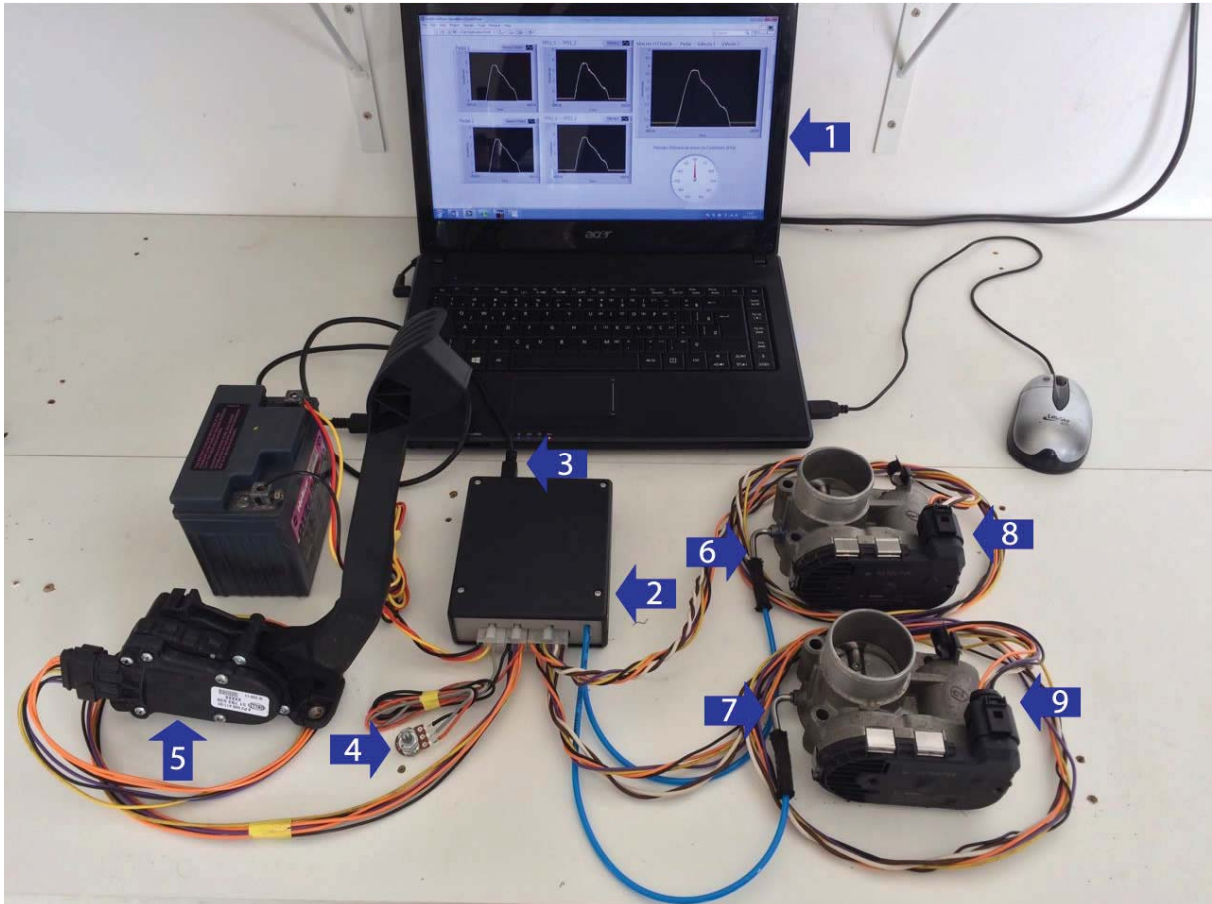


APÊNDICE C – INTERIOR DO CONTROLADOR



- 1 – LM2940 – Fonte de alimentação 5 V;
- 2 – MPXV7025DP – Sensor de pressão diferencial;
- 3 – PIC18F46k22-I/P;
- 4- Conector ICD2 (gravador PICKIT3);
- 5 – Conector USB (comunicação com o software supervisor);
- 6 – Pontes-H (Válvula borboleta 1, Válvula borboleta 2);
- 7 – Conector Alimentação +12 V e entrada sinal marcha-lenta;
- 8 – Conector pedal acelerador;
- 9 – Conector Válvula borboleta 1 e Válvula borboleta 2;

APÊNDICE D – COMPONENTES DO SISTEMA



- 1 – Software Supervisório
- 2 – Controlador
- 3 – Comunicação USB
- 4 – Sinal marcha-lenta
- 5 – Pedal acelerador
- 6 – Leitura de pressão válvula borboleta 1
- 7 – Leitura de pressão válvula borboleta 2
- 8 – Válvula borboleta 1
- 9 – Válvula borboleta 2

ANEXO A – DATASHEET VÁLVULA BORBOLETA

Bosch Motorsport | Electronic Throttle Body

Electronic Throttle Body

www.bosch-motorsport.com



- ▶ Many bore diameters available
- ▶ Throttle position sensor is redundant
- ▶ For flex-fuel, CNG, LPG
- ▶ Idle default position

The throttle body is designed to control the fresh air of spark ignition engines in combination with an electronic throttle control system. ETB applications with flex-fuel, CNG and LPG are permissible if injected in the air flow after the throttle body.

A typical ETC system includes the following components: electronic throttle body, accelerator pedal module and electronic control unit.

You will find the available bore diameters in the variations table.

Application

Temperature range	
Max. vibration	50 to 250 m/s ² at 50 Hz to 2 kHz

Technical Specifications

Mechanical Data

Available bore diameters	32 mm
	40 mm
	44 mm
	46 mm
	50 mm
	52 mm
	54 mm
60 mm	

Electrical Data

Supply voltage	6 to 16 V
Supply voltage sensor	5 ± 0.2 V
Max. allowed generator current	<10.0 A
Freq. Operation	2 khz - 22 khz

Characteristic

Output signal I	0 to 5 V for 0 to 90°
Output signal II	5 to 0 V for 0 to 90°

Connectors and Wires

Various motorsport and automotive connectors are available on request.

Please specify the required wire length with your order.

Installation Notes

For correct mounting please respect the hints on the next page "Mounting position".

The ETB can be connected directly to control units with ETC functionality.

2 | Electronic Throttle Body

Please find further application hints in the offer drawing at our homepage.

Two redundant sensors control the up to date throttle position.

All ETBs have an idle air position.

Ordering Information

Electronic Throttle Body 32 mm

Order number **0 280 750 148**

Electronic Throttle Body 40 mm

Order number **0 280 750 149**

Electronic Throttle Body 44 mm

Order number **0 280 750 255**

Electronic Throttle Body 46 mm

Order number **F 02U V01 171-01**

Electronic Throttle Body 50 mm

Order number **0 280 Y05 107-10**

Electronic Throttle Body 52 mm

Order number **F 02U V01 184-01**

Electronic Throttle Body 54 mm

Order number **0 280 750 150**

Electronic Throttle Body 60 mm

Order number **0 280 750 151**

Electronic Throttle Body 68 mm

Order number **0 280 750 156**

Electronic Throttle Body 82 mm

Order number **0 280 750 101**

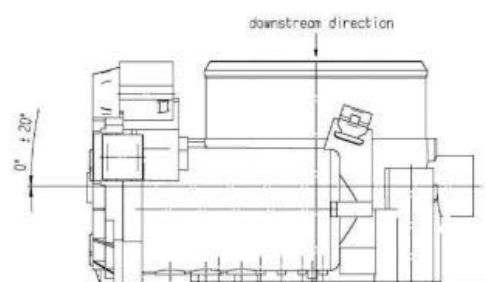
3 | Electronic Throttle Body

Dimensions

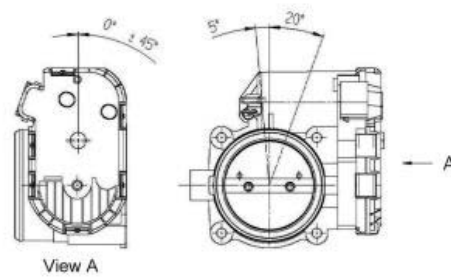
Mounting position

Mounting position of the Throttle Actuator

- Horizontal inclination of the Throttle shaft: $\pm 20^\circ$
- Horizontal inclination of the cover: $\pm 180^\circ$
- Mounting positions which deviate from this need separate testing.
- It has to be prevented that when mounted in the vehicle, no condensed moisture can soak into the Throttle shaft bore holes (e.g. from the crankcase ventilation)








IN CASE OF MOUNTING POSITION WITH DC-MOTOR ON TOP
A COMBINATION OF THE ANGLES SHOWN BELOW IS NOT ALLOWED!



4 | Electronic Throttle Body

Electronic Throttle Body Variations

	Electronic Throttle Body 32 mm	Electronic Throttle Body 40 mm	Electronic Throttle Body 44 mm	Electronic Throttle Body 46 mm	Electronic Throttle Body 50 mm
					
Bore diameter (mm)	32	40	44	46	50
Connector	D 261 205 358-01	D 261 205 358-01	D 261 205 358-01	D 261 205 356-01	D 261 205 356-01
Pin 1 A	Motor -	Motor -	Motor -	Poti 1	Poti 2
Pin 2 B	Poti -	Poti -	Poti -	Poti -	Poti -
Pin 3 C	Poti +	Poti +	Poti +	Motor -	Motor +
Pin 4 D	Motor +	Motor +	Motor +	Poti 2	Poti 1
Pin 5 E	Poti 2	Poti 2	Poti 2	Motor +	Motor -
Pin 6 F	Poti 1	Poti 1	Poti 1	Poti +	Poti +
Flange diameter (mm)	40	50	50	58	58
Weight (kg)	0,9	0,9	0,9	0,95	0,95
Max. air flow rate*	394 kg/h at 85° angle	695 kg/h at 85° angle	Not specified	978 kg/h at 85° angle	Not specified
Opening direction **	counterclockwise	counterclockwise	counterclockwise	clockwise	counterclockwise

	Electronic Throttle Body 52 mm	Electronic Throttle Body 54 mm	Electronic Throttle Body 60 mm	Electronic Throttle Body 68 mm	Electronic Throttle Body 82 mm
					
Bore diameter (mm)	52	54	60	68	82
Connector	D 261 205 356-01	D 261 205 358-01	D 261 205 358-01	D 261 205 358-01	D 261 205 358-01
Pin 1 A	Poti 1	Motor -	Motor -	Motor -	Motor -
Pin 2 B	Poti -	Poti -	Poti -	Poti -	Poti -
Pin 3 C	Motor -	Poti +	Poti +	Poti +	Poti +
Pin 4 D	Poti 2	Motor +	Motor +	Motor +	Motor +
Pin 5 E	Motor +	Poti 2	Poti 2	Poti 2	Poti 2
Pin 6 F	Poti +	Poti 1	Poti 1	Poti 1	Poti 1
Flange diameter (mm)	58	70	68,5	75	90
Weight (kg)	0,95	0,95	0,95	1,1	1,1
Max. air flow rate*	Not specified	Not specified	Not specified	Not specified	Not specified
Opening direction **	clockwise	counterclockwise	counterclockwise	counterclockwise	counterclockwise

* ambient conditions: Air pressure $p=1000$ mbar, Differential pressure $\Delta p=600$ mbar ± 25 mbar, rel. humidity $rF=40$ %, Air temperature $T=24^{\circ}\text{C}$

** Opening direction is related to view A. See drawings on bottom of chapter "Dimensions".